НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

ИЗВЕСТИЯ ПЕТЕРБУРГСКОГО УНИВЕРСИТЕТА ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ, том 17, выпуск 2, 2020

ISSN (Print) 1815-588X

ISSN (Online) 2658-6851

Учредитель и издатель

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I»

Адрес учредителя и издателя

190031, СПб., Московский пр., 9, тел. (812) 314-92-32; ООО «ИД Т-ПРЕССА», 190031, СПб., наб. р. Фонтанки, 117-А, пом. 33H, офис 351, тел. 8(921)099-94-77

Адрес редакции

190031, СПб., Московский пр., 9, тел. (812) 314-92-32; ООО «ИД Т-ПРЕССА», 190031, СПб., наб. р. Фонтанки, 117-А, пом. 33H, офис 351, тел. 8(921)099-94-77 e-mail: izvestia@izvestiapgups.org

Свидетельство о регистрации средства массовой информации

ПИ № ФС2-7499 от 06.04.2005 г., выдано Федеральной службой по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия, Управление по Северо-Западному федеральному округу

Журнал зарегистрирован

в Российском индексе научного цитирования (РИНЦ)

Журнал включен в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий (решение Президиума Высшей аттестационной комиссии Минобрнауки России от 29.12.2015 г., № 6/6)

Журнал публикует научные статьи в областях технические науки (05.00.00): транспорт (05.22.00)

Журнал имеет институт рецензирования

Журнал распространяется

по адресно-целевой подписке через редакцию и каталог ОАО «Роспечать» (индекс 18509)

РЕДАКЦИЯ ЖУРНАЛА

Главный редактор

А. Ю. Панычев, канд. экон. наук, доцент

Заместитель главного редактора

А. К. Канаев, д-р техн. наук, доцент

Научный редактор

А. М. Евстафьев, д-р техн. наук, доцент

Выпускающий редактор

Э. А. Горелик

Перевод на английский язык

А. Н. Крышня, Д. И. Иванов

Верстка

А. А. Стуканова

Редактор

В. Е. Филиппова

МЕЖДУНАРОДНЫЙ РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Панычев Александр Юрьевич, канд. экон. наук, доцент, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия, председатель Совета

Шнайдер Экхард, профессор, Фраунгоферовский институт неразрушающего контроля, Саарбрюкен, Германия

Ситаж Марек, профессор, Силезский технический университет, Польша

Христов Христо, профессор, Технический университет, София, Болгария

РЕДКОЛЛЕГИЯ

Сапожников Валерий Владимирович, д-р техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия, председатель редколлегии Бадёр Михаил Петрович, д-р техн. наук, профессор, МГУПС (МИИТ), Москва, Россия

Белаш Татьяна Александровна, д-р техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Беленцов Юрий Алексеевич, д-р техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Блажко Людмила Сергеевна, д-р техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Бороненко Юрий Павлович, д-р техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Брынь Михаил Ярославович, д-р техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Губачева Лариса Александровна, д-р техн. наук, профессор, Восточно-Украинский национальный университет им. В. Даля, Луганск, Украина

Егоров Владимир Викторович, д-р техн. наук, доцент, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Канаев Андрей Константинович, д-р техн. наук, доцент, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Ледяев Александр Петрович, д-р техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Петрова Татьяна Михайловна, д-р техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Покровская Оксана Дмитриевна, д-р техн. наук, доцент, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Смирнов Владимир Николаевич, д-р техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Соловьева Валентина Яковлевна, д-р техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Талантова Клара Васильевна, д-р техн. наук, доцент, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Титова Тамила Семеновна, д-р техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Фролов Юрий Степанович, д-р техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Шангина Нина Николаевна, д-р техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Штыков Валерий Иванович, д-р техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Фото на обложке из архивов библиотеки Φ ГБОУ ВО ПГУПС. 1910 г.

Подписано в печать с оригинал-макета 30.06.2020. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная. Печать МФУ. Усл. печ. л. 14,0. Установочный тираж 300 экз.

Заказ ???. Цена свободная.

Отпечатано в типографии ООО «Издательство ОМ-Пресс» 190031, СПб., наб. р. Фонтанки, 117

© ФГБОУ ВО ПГУПС, 2020

SCIENTIFIC PUBLICATION

PROCEEDINGS OF PETERSBURG TRANSPORT UNIVERSITY, volume 17, issue 2, 2020

ISSN (Print) 1815-588X ISSN (Online) 2658-6851

Founder and publisher

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Emperor Alexander I Petersburg State Transport University"; OOO "ID T-PRESS"

Founder and publisher address

190031, St. Petersburg, Moskovskiy pr., 9, (812) 314-92-32;

190031, St. Petersburg, Fontanka River emb., 117-A, prem. 33N, of. 351, 8(921)099-94-77

Editorial address

190031, St. Petersburg, Moskovskiy pr., 9, (812) 314-92-32; 190031, St. Petersburg, Fontanka River emb., 117-A, prem. 33N, of. 351, 8(921)099-94-77 e-mail: izvestia@izvestiapgups.org

Mass media registration certificate number

ΠΙΛ N ΦC2-7499 dd. 06.04.2005 issued by the Federal service for the monitoring of legislation compliance in the sphere of mass communications and the preservation of cultural heritage, North West Federal district division

The journal is registered in the Russian Science Citation Index (RSCI)

The journal is included in the List of leading peer-reviewed scientific journals and publications

The journal publishes scientific articles in the fields of Technics (05.00.00): Transport (05.22.00)

The journal has the Peer-review division

The journal is destributed by direct subscription via Editorial office and Rospechat catalogue (item 18509)

JOURNAL STAFF

Editor-in-chief

A. Yu. Panychev, PhD of Economics, Associate Professor

Deputy chief editor

A. Kanayev, D. Eng. Sci., Associate Professor

Science editor

A. Evstafev, D. Eng. Sci., Associate Professor

Executive editor

E. Gorelik

English translation

A. Kryshnia, D. Ivanov

Layout

A. Stukanova

Editor

V. Philippova

INTERNATIONAL EDITORIAL BOARD

Aleksander Panychev, PhD of Economics, Professor, Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia, Chairman of Editorial board

Ekhard Shneider, Professor, Fraunhofer Institute for Non-Destructive Testing, Saarbrucken, Germany

Marek Sitazh, Professor, Silesian University of Technology, Poland

Khristo Khristov, Professor, Technical University of Sofia, Bulgaria

EDITORIAL TEAM

Valeriy Sapozhnikov, D. Eng. Sci., Professor, Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia, Chairman of Editorial team

Mikhail Badyer, D. Eng. Sci., Professor, Moscow State University of Railway Engineering, Moscow, Russia

Tatiana Belash, D. Eng. Sci., Professor, Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Yury Belentsov, D. Eng. Sci., Professor, Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Liudmila Blazhko, D. Eng. Sci., Professor, Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Yuriy Boronenko, D. Eng. Sci., Professor, Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Mikhail Bryn', D. Eng. Sci., Professor, Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Larisa Gubachyeva, D. Eng. Sci., Professor, Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, Luhansk, Ukraine

Vladimir Egorov, D. Eng. Sci., Associate Professor, Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Andrey Kanayev, D. Eng. Sci., Associate Professor, Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Aleksander Ledyayev, D. Eng. Sci., Professor, Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Tatiana Petrova, D. Eng. Sci., Professor, Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Oksana Pokrovskaya, D. Eng. Sci., Associate Professor, Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Vladimir Smirnov, D. Eng. Sci., Professor, Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Valentina Solovyova, D. Eng. Sci., Professor, Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Klara Talantova, D. Eng. Sci., Associate Professor, Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Tamila Titova, D. Eng. Sci., Professor, Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Yury Frolov, D. Eng. Sci., Professor, Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Nina Shangina, D. Eng. Sci., Professor, Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Valeriy Shtikov, D. Eng. Sci., Professor, Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Published by Petersburg State Transport University 190031, St. Petersburg., Moskovskiy pr., 9 Open price

© Petersburg State Transport University, 2020

СОДЕРЖАНИЕ

\rightarrow	ПРОБЛЕМАТИКА ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ	
K.K.	Ким, С.Н. Иванов, М.И. Хисматулин	
	Гидродинамическое моделирование гибридных энергетических устройств с использованием CFD-технологий	161
K.K.	Kim, S.N. Ivanov, M.I. Khismatulin	
	Hydrodynamic modeling of hybrid energy devices using CFD technologies	170
О.Д.	Покровская	
	Терминалистика – новая дисциплина в высшем транспортном образовании	177
P. M.	Тлявлин	
	Оценка технического состояния волногасящих сооружений инженерной защиты земляного полотна от волнового воздействия	198
\rightarrow	СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ – ТРАНСПОРТУ	
Α. Α.	Воробьев, В. И. Кулик, А. С. Нилов, М. А. Спирюгова	
	Перспективные технологии производства тормозных дисков из керамоматричных композитов на основе SiC-матрицы систем торможения высокоскоростного железнодорожного транспорта	210
A.M	. Орлова, Е. А. Рудакова, Д. В. Шевченко, А. В. Гусев, Г. С. Шалпегин	
	Подходы к оценке напряженно-деформированного состояния пружин рессорного подвешивания грузовых вагонов	221
Ю. В	. Чернышева, В. А. Дубинский	
	Влияние пространственных колебаний грузовых вагонов на движение состава и затраты энергетических ресурсов	233
\rightarrow	ОБЩЕТЕХНИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ	
E. M.	Боденко, М. В. Шершнева	
	Утилизация продуктов сноса зданий и сооружений при рекультивации гранитных карьеров с использованием мультимодальной логистики	244
О.И.	Зайнитдинов, Б. А. Абдуллаев	
	Конструирование пневмомеханического кантователя для ремонта боковых рам грузовых вагонов	252
M. B.	Шершнева, А.Б. Бобровник	
	Применение природных растворов для обезвреживания ионов свинца	263

CONTENTS

→ PROBLEMATIC OF TRANSPORT SYSTEM	
K.K. Kim, S.N. Ivanov, M.I. Khismatulin Hydrodynamic simulation of hybrid energy devices using CFD technologies	161
K. K. Kim, S. N. Ivanov, M. I. Khismatulin	
Hydrodynamic modeling of hybrid energy devices using CFD technologies	170
O. D. Pokrovskaya	
Terminalistics as a new discipline in higher transport education	177
R.M. Tlyavlin	
Assessment of the technical condition of wave canceling structures for engineering protection of roadbeds from wave exposure	198
→ HIGH TECHNOLOGIES FOR TRANSPORT	
A. A. Vorobyev, V. I. Kulik, A. S. Nilov, M. A. Spiryugova	
Promising technologies for the production of brake discs from SiC ceramic matrix composites for braking systems of high-speed railway transport	210
A. M. Orlova, E. A. Rudakova, D. V. Shevchenko, A. V. Gusev, G. S. Shalpegin	
Approaches to assessing the stress-strain state of freight car spring suspension coils	221
Iu. V. Chernysheva, V. A. Dubinsky	
Effect of cargo wagons' spatial variation on train movement and consumption of energy resources	233
→ GENERAL TECHNICAL PROBLEMS AND SOLUTION APPROACH	
E. M. Bodenko, M. V. Shershneva	
Utilisation of demolition waste in reclamation of granite quarries using multi-modal logistics	244
O. I. Zaynitdinov, B. A. Abdullayev	
Designing a pneumatic mechanical tilter for repair of freight wagon bogie side frames	252
M. V. Shershneva, A. B. Bobrovnik	
Application of natural solutions to deactivation of lead nuclei	263

ПРОБЛЕМАТИКА ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

 \rightarrow

УДК 621.313.5

Гидродинамическое моделирование гибридных энергетических устройств с использованием CFD-технологий

К.К. Ким¹, **С.Н. Иванов**², **М.И. Хисматулин**¹

- ¹ Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9
- ² Комсомольский-на-Амуре государственный университет, Российская Федерация, 681013, Дальневосточный федеральный округ, Хабаровский край, Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27

Для цитирования: Ким К. К., Иванов С. Н., Хисматулин М. И. Гидродинамическое моделирование гибридных энергетических устройств с использованием СFD-технологий // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2020. — Т. 17. — Вып. 2. — С. 161—169. DOI: 10.20295/1815-588X-2020-2-161-169

Аннотация

Цель: Создание научно обоснованного метода проектирования и моделирования гибридных энергетических устройств (ГЭУ) при одновременном учете влияния электромагнитных, тепловых и механических факторов на температуру, коэффициент полезного действия и давление теплоносителя. **Методы:** В качестве основных математических средств использованы методы математического анализа, вычислительная математика, методы математического программирования. Использовался пакет системы проектирования SolidWorksFlowSimulation. **Peзультаты:** Разработан метод проектирования и моделирования ГЭУ, позволяющий получать поля скоростей теплоносителя в рабочем канале ГЭУ. Онлайн-визуализация результатов численного моделирования дает возможность полного и качественного их анализа. **Практическая значимость:** При проектировании и исследовании ГЭУ возможности гидродинамического моделирования позволяют построить поля скоростей рабочего тела в рабочем канале ГЭУ, а онлайн-визуализация результатов численного моделирования — не только визуально представлять результаты гидродинамического расчета, но и анализировать изучаемые процессы, т. е. играет роль инструмента, когда исследуются и проектируются современные инженерные системы.

Ключевые слова: Численное моделирование, гидродинамический расчет, визуализация, инженерный анализ.

Актуальной проблемой является создание новых типов энергетических устройств, обеспечивающих возможность энерго- и ресурсосбережения, характеризующихся возможностью экономичного и точного поддержания заданных

рабочих параметров и отвечающих современным требованиям электробезопасности, надежности, технологичности и экологичности.

Примерами такого оборудования могут служить гибридные энергетические устройства

^{*} Английский вариант статьи опубликован в этом сборнике на с. 170–176.

(ГЭУ), одновременно выполняющие функции электрического нагрева теплоносителя и его перекачки. ГЭУ обеспечивают повышенную эффективность производства и снижение себестоимости конечного продукта [1, 2].

К достоинствам ГЭУ относятся существенно улучшенные технико-экономические показатели, возможность точного управления мощностью электрообогрева непосредственно на месте потребления и выходными характеристиками.

Основной проблемой при проектировании ГЭУ является необходимость одновременного учета электромагнитных, гидравлических и тепловых процессов. Поэтому для определения оптимальных конструктивных параметров ГЭУ целесообразно применять численные методы [3], методы экспериментального проектирования и проектирования с помощью интегрированных САD (САD/САЕ-систем) [4]. Они считаются мощным инструментом создания современных инженерных систем и широко используются при решении задач поискового проектирования, оптимизации и моделирования сложных физических процессов. Это позволяет создать научно обоснованный метод проектирования ГЭУ при учете одновременного влияния факторов различного происхождения на температуру, коэффициент полезного действия и давление теплоносителя.

Особый интерес представляет использование CFD-технологий при проектировании ГЭУ и выполнении гидродинамических расчетов. Пакет SolidWorksFlowSimulation обладает большими возможностями анализа гидравлических процессов. Система SolidWorks — одна из первых систем проектирования и анализа, содержащая полноценные интегрированные инструменты решения задач гидравлической газодинамики и теплообмена.

Основными достоинствами SolidWorks Flow Simulation при моделировании и исследовании ГЭУ являются:

- использование единой среды проектирования и анализа;
- возможность моделирования стационарного внутреннего несжимаемого потока, учета вы-

нужденной конвекции, а также турбулентного и переходного течений;

- выбор объемного расхода (на входе) и давления (на выходе) в качестве граничных условий неподвижной стенки;
- создание расчетной сетки непосредственно моделью SolidWorks, автоматическое построение расчетного диапазона и создание сетки в области твердого тела и потока, настройка параметров расчетной сетки для повышения точности расчета зоны теплопередачи, учет вращающихся и неподвижных объемов;
- определение целей моделирования (при контроле вычислительных процедур) без его остановки;
- получение результатов расчета в виде цветовых диаграмм на плоскости или поверхности, 3D-траекторий потоков, распределений любых характеристик по кривой линии; анимации результатов и т. д.

Моделирование гидродинамических процессов в ГЭУ в среде SolidWorksFlowSimulation выполняется по следующим этапам:

- 1) создание расчетной параметрической трехмерной модели ГЭУ;
 - 2) установление граничных условий (рис. 1);
- 3) выбор моделей физических явлений, происходящих в жидких средах;
 - 4) выбор метода расчета;
 - 5) анализ результатов расчета.

После проведения гидродинамического расчета ГЭУ его результаты и визуализация могут быть представлены в виде [5]

- цветных эпюр в разрезе (Cut Plots);
- цветных эпюр на поверхности (Surface Plots);
 - изоповерхностей (Isosurfaces);
- визуализации линий потока жидкости (Flow Trajectories);
- значений параметров в точке (Point Parameters):
- значений параметров на поверхности (Surface Parameters);
- значений параметров в объеме (Volume Parameters);
 - участков (XY Plots);

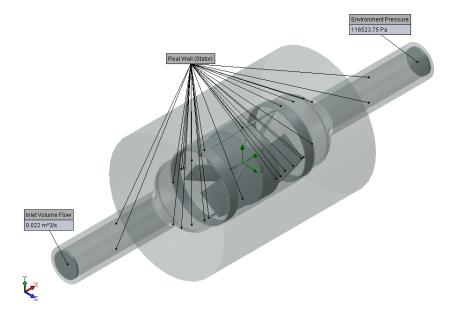


Рис. 1. Компьютерная модель ГЭУ

- зависимостей изменения сходимости целей (Goals):
 - отчета (Report);
 - фильмов (Animations).

На рис. 2-10 показаны некоторые возможные варианты визуализации результатов гидродинамического расчета ГЭУ в среде SolidWorks FlowSimulation.

Используя Cut Plots, визуализируется распределение значений скорости течения теплоносителя в поперечном сечении (рис. 2). Распределение параметров показываем в виде заливок (Contours) и векторов скорости (Vectors). Цвета заливок и векторов соответствуют распределению скорости.

С помощью Surface Plots визуализируется распределение значений скорости течения теплоносителя на выбранной поверхности модели (грани лопасти), контактирующей с текучей средой (рис. 3). Целевая поверхность выбирается непосредственно на модели [6–11].

Isosurfaces иллюстрирует поверхность, в каждой ее точке давление равно определенной величине (рис. 4). Цвета поверхностей уровня соответствуют распределению давления на изоповерхности.

Используя Flow Trajectories в канале ГЭУ, можно построить линии потока теплоносителя. В каждой точке данной линии вектор скорости направлен к ней по касательной (рис. 5).

Одним из эффективных методов визуализации результатов является создание фильма линий потока теплоносителя, который показывает распространение теплоносителя в рассматриваемом объеме.

Одновременно с использованием Point Parameters определяем скорости теплоносителя в пределах расчетной области в конкретных точках, заданных на выходе лопасти (рис. 6).

С помощью Surface Parameters можно найти значения локальных физических параметров (давление, температура, скорость и т. д.) и интегральных физических параметров (расход теплоносителя, силы, моменты и т. д.) на выбранной поверхности. Когда изучаются ГЭУ, определяются скорости потока теплоносителя и давления на грани лопасти (рис. 7).

Создаются вспомогательные тела для расчета средней скорости в зонах теплообмена и переноса теплоносителя. При этом такие тела представляются отдельными компонентами и принимаются как расчетные объемы. С по-

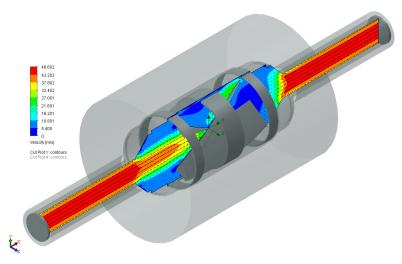


Рис. 2. Эпюры разрезов: распределение скорости в продольном сечении ГЭУ (Contours, Vectors)

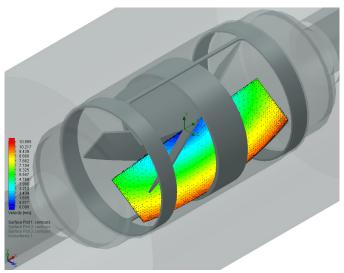


Рис. 3. Surface Plots: распределение скоростей на грани лопасти (Contours, Vectors)

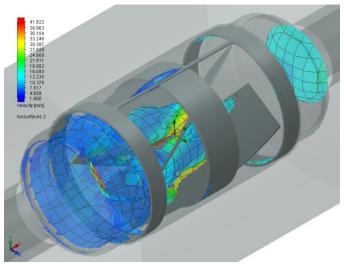


Рис. 4. Isosurfaces: поверхности уровня давления со значениями скорости, нанесенными на них в режиме цветной заливки сеткой

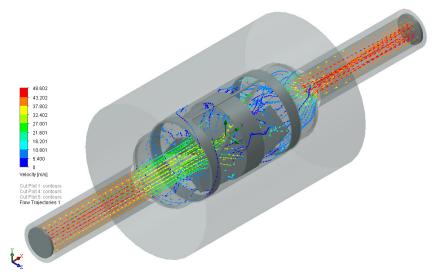


Рис. 5. Визуализация линий потока теплоносителя с нанесенной на них скоростью

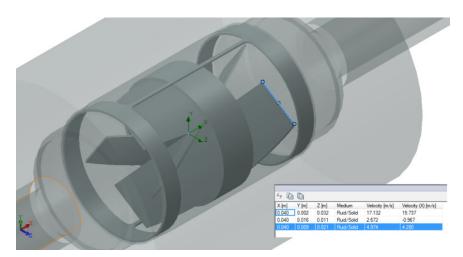


Рис. 6. Point Parameters: значения скорости в трех точках на выходе лопасти

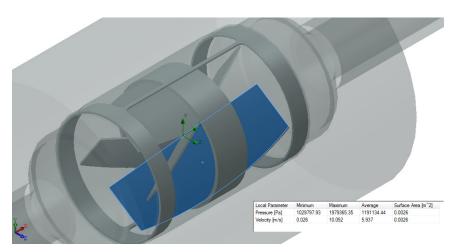


Рис. 7. Surface Parameters: значения скорости и давления на грани лопасти

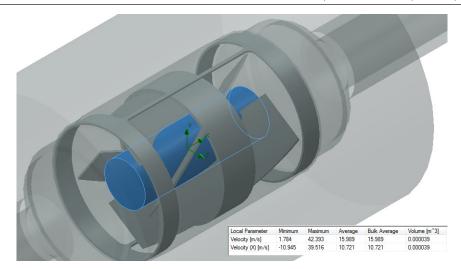


Рис. 8. Volume Parameters: значения скорости в исследуемом объеме

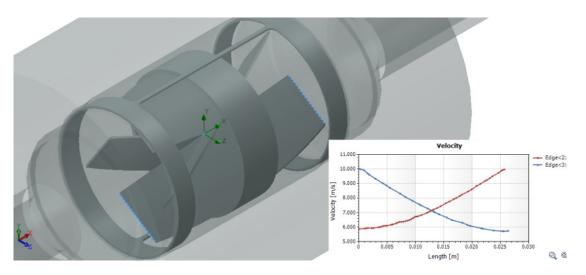


Рис. 9. XY Plot: изменение скорости по кромкам лопасти на входе и выходе лопасти

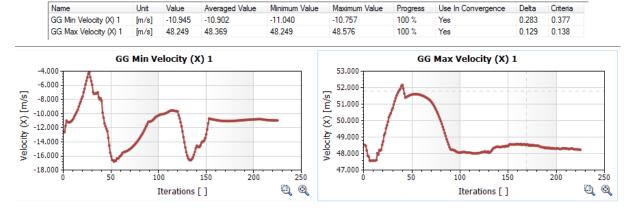


Рис. 10. Goal Plots: минимальные и максимальные значения осевой компоненты скорости

мощью инструмента Volume Parameters определяются средние значения осевой составляющей скорости теплоносителя в исследуемом объеме (рис. 8).

XY Plots позволяет увидеть изменение физических параметров вдоль желаемой линии. В качестве этой линии можно использовать любую линию, определяемую графическими инструментами, например двух- или трехмерные чертежи, кривые. На рис. 9 показано изменение скорости вдоль кончиков лопасти на входе и выходе лопасти.

С помощью инструмента визуализации Goal Plots возможно контролировать изменение целевого физического параметра в процессе расчета. При исследовании ГЭУ в качестве целевых параметров выбираются минимальные и максимальные значения осевой компоненты скорости (рис. 10).

Более того, в среде SolidWorksFlowSimulation можно создать отчет о выполненном расчете в Microsoft Word (Report). Информация отчета может быть включена в существующий документ Word или можно создать новый документ с этой информацией с использованием стандартного шаблона или шаблона, желаемого пользователем.

Особо следует отметить широкие возможности SolidWorksFlowSimulation для создания фильмов (Animation) с целью визуализации картины изменения параметров в пространстве и во времени. Возможны одновременная анимация различных картин, а также анимация модели целиком (вращение, смещение, масштабирование) или анимация вращения отдельных составных частей модели.

При проектировании и исследовании ГЭУ возможности гидродинамического моделирования позволяют получать поля скоростей теплоносителя в рабочем канале ГЭУ, а онлайнвизуализация результатов численного моделирования дает возможность полного и качественного их анализа. Визуализация не только визуально представляет результаты гидродинамического расчета, но и анализирует изучаемые процессы, т. е. играет роль инструмента, используемого при

исследовании и проектировании современных инженерных систем.

Библиографический список

- 1. Патент № 2451430 РФ, ПДК Н 05 В 6/10. Устройство для нагрева и перекачки текучей среды / О.В. Приходченко, Н. Н. Случанинов, С. Н. Иванов, М. А. Шпилев, К. К. Ким, А. Г Микеров. Заявл. 22.02.2011 г. Опубл. 20.05.2012. Бюл. № 14.
- 2. Ким К. К. Электромеханические генераторы тепловой энергии / К. К. Ким, С. Н. Иванов. Caap-брюккен: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2011.—352 с.
- 3. Приходченко О. В. Математическое моделирование и анализ электромагнитных и тепловых процессов в электромеханических нагревательных преобразователях / О. В. Приходченко // Учен. зап. Комсомольск-на-Амуре гос. технич. ун-та. Сер. «Науки о природе и технике». -2011. Сер. III. № 1(7). С. 27—37.
- 4. Приходченко О.В. Моделирование герметичных узлов электромеханических насосных устройств в системе T-FLEX CAD / О.В. Приходченко, А.А. Просолович, И.А. Приходченко // САПР и компьютерная графика. 2012. —№ 2.— С. 88—91.
- 5. Альямовский А. А. SolidWorks 2007/2008. Компьютерное моделирование в инженерной практике / А. А. Алямовский, А. А. Собачкин, Е. В. Одинтцов, А. И. Харитонов, Н. Б. Пономарев. СПб. : БХВ-Петербург, 2008. 1040 с.
- 6. Hexagon. URL: http://www.mscsoftware.com (дата обращения: 17.01.2020 г.)
- 7. Kim K. K. The stability of a synchronous machine with zero-flux stator winding to small radial disturbances / K. K. Kim // Electrical Technology Russia. 1999. Iss. 4. P. 66–77.
- 8. Kim K. K. On the problem of determining speed-torque characteristics of thermal electromechanical converters / K. K. Kim // Russian Electrical Engineering. 2009. Vol. 80. Iss. 8. P. 459–465.
- 9. Ivanov S. N. Heat-generating electromechanical converter / S. N. Ivanov, K. K. Kim, I. M. Karpova // Rus-

sian Electrical Engineering. – 2008. – Vol. 79. – Iss. 9. – P. 508–513.

- 10. Kim K. I. Equations of a synchronous machine with electrodynamic suspension of the rotor / K. I. Kim, K. K. Kim // Elektricity. 1989. Iss. 1. P. 10–22.
- 11. Kim K. K. The analysis of the influence of constructional factors on the winding reliability of the heating electromechanical transducers / K. K. Kim, N. S. Karpova, O. V. Prikhodchenko // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. СПб. : ПГУПС, 2013. Вып. 4. С. 26—31.

Дата поступления: 11.02.2020 г. Решение о публикации: 18.02.2020 г.

Контактная информация:

КИМ Константин Константинович — д-р техн. наук, профессор; kimkk@inbox.ru ИВАНОВ Сергей Николаевич — д-р техн. наук, профессор; snivanov57@mail.ru XИСМАТУЛИН Марат Ильдусович — аспирант; lokomotivlar@gmail.com

Hydrodynamic simulation of hybrid energy devices using CFD technologies*

K.K. Kim¹, S.N. Ivanov², M.I. Khismatulin¹

- ¹ Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation
- ² Komsomolsk-on-Amur State University, 27, Lenina pr., Komsomolsk-on-Amur, Khabarovsk territory, Far Eastern Federal District, 681013, Russian Federation

For citation: Kim K. K., Ivanov S. N., Khismatulin M. I. Hydrodynamic simulation of hybrid energy devices using CFD technologies. *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2020, vol. 17, iss. 2, pp. 161–169. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2020-2-161-169

Summary

Objective: To create a scientifically justified method for designing and simulation of hybrid energy devices (HED) while considering the influence of electromagnetic, thermal and mechanical factors on the coolant temperature, performance and pressure. **Methods:** Mathematical analysis, computational mathematics and mathematical programming methods have been used as the basic mathematical tools. The SolidWorksFlowSimulation design system kit has been applied. **Results:** The authors have created a method for designing and simulation of HEDs, which allows one to generate the coolant velocity profile in the HED working channel. Online visualization makes it possible to analyze the results of numerical simulation fully and qualitatively. **Practical importance:** Hydrodynamic modeling in the design and study of the HEDs allows for building the velocity profiles of the working body in the HED working channel, while online visualization of the numerical simulation findings provides the opportunity not only to visually present the hydrodynamic calculation results but also to analyze the processes under study, i. e. plays the role of a tool in study and design of the state-of-the-industry engineering systems.

Keywords: Numerical simulation, hydrodynamic calculation, visualization, engineering review.

^{*} English variant of article is published on pp. 170–176.

References

- 1. Prikhodchenko O. V., Slushaninov N. N., Ivanov S. N., Shpilev M.A., Kim K. K. & Mikerov A. G. *Patent no. 2451430 Russian Federation, IPC N 05 V 6/10. Device for fluid heating and pumping*. Appl. February 22, 2011, publ. May 20, 2012. Bul. no. 14 (In Russian)
- 2. Kim K. K. & Ivanov S. N. Elektromekhanicheskiye generatory teplovoy energii [Electromechanical generators of thermal power]. Saarbrücken, LAP LAMBERT Academic Publ., 2011, 352 p. (In Russian)
- 3. Prikhodchenko O. V. Matematicheskoye modelirovaniye i analiz elektromagnitnykh i teplovykh protsessov v elektromekhanicheskikh nagrevatel'nykh preobrazovatelyakh [Mathematical modeling and analysis of electromagnetic and thermal processes in heat-generating electromechanical converters]. *Uchenyye zapiski Komsomol'sk-na-Amure gos. tekhnich. Un-ta* [Scientific notes of the Komsomolsk-on-Amur State Technical University], 2011, series III, no. 1 (7), pp. 27–37. (In Russian)
- 4. Prikhodchenko O. V., Prosolovich A.A. & Prikhodchenko I.A. Modelirovaniye germetichnykh uzlov elektromekhanicheskikh nasosnykh ustroystv v sisteme T-FLEX CAD [Modeling electromechanical pumping device sealed units in the T-FLEX CAD system]. SAPR i komp'yuternaya grafika [CAD and Computer Graphics Journal], 2012, no. 2, pp. 88–91. (In Russian)
- 5. Alyamovskiy A.A., Sobachkin A.A., Odintsov E. V., Kharitonov A. I. & Ponomaryov N. B. *SolidWorks 2007/2008. Komp'yuternoye modelirovaniye v inzhenernoy praktike* [SolidWorks 2007/2008. Computer modeling in engineering practice]. Saint Petersburg, BHV-Petersburg Publ., 2008, 1040 p. (In Russian)

- 6. *Hexagon*. Available at: http://www.mscsoftware.com (accessed: January 17, 2020).
- 7. Kim K. K. The stability of a synchronous machine with zero-flux stator winding to small radial disturbances. *Electrical Technology Russia*, 1999, iss. 4, pp. 66–77.
- 8. Kim K. K. On the problem of determining speed-torque characteristics of thermal electromechanical converters. *Russian Electrical Engineering*, 2009, vol. 80, iss. 8, pp. 459–465.
- 9. Ivanov S. N., Kim K. K. & Karpova I. M. Heat-generating electromechanical converter. *Russian Electrical Engineering*, 2008, vol. 79, iss. 9, pp. 508–513.
- 10. Kim K. I. & Kim K. K. Equations of a synchronous machine with electrodynamic suspension of the rotor. *Elektricity*, 1989, iss. 1, pp. 10–22.
- 11. Kim K. K., Karpova N. S. & Prikhodchenko O. V. The analysis of the influence of constructional factors on the winding reliability of the heating electromechanical transducers. *Izvestiia Peterburgskogo universiteta putei soobshenii* [*Proceedings of Petersburg Transport University*]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2013, iss. 4, pp. 26–31.

Received: February 11, 2020 Accepted: February 18, 2020

Author's information:

Konstantin K. KIM – D. Sci. in Engineering, Professor; kimkk@inbox.ru Sergey N. IVANOV – D. Sci. in Engineering, Professor; snivanov57@mail.ru Marat I. KHISMATULIN – Postgraduate Student; lokomotivlar@gmail.com UDC 621.313.5

Hydrodynamic modeling of hybrid energy devices using CFD technologies

K.K. Kim¹, S.N. Ivanov², M.I. Khismatulin¹

- ¹ Petersburg State Transport University, 9, Moscovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation
- ² Komsomolsk-on-Amur State University, 27, Lenina pr., Komsomolsk-on-Amur, Khabarovsk territory, Far Eastern Federal District, 681013, Russian Federation

For citation: Kim K. K., Ivanov S. N., Khismatulin M. I. Hydrodynamic modeling of hybrid energy devices using CFD technologies. *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2020, vol. 17, iss. 2, pp. 170–176. DOI: 10.20295/1815-588X-2020-2-170-176

Summary

Objective: It is the creation of a scientifically based method for designing and modeling hybrid energy devices (HED) while taking into account the influence of electromagnetic, thermal and mechanical factors on the temperature, efficiency and pressure of the heat carrier. Methods: We use the methods of mathematical analysis, computational mathematics, methods of mathematical programming as the main mathematical tools. The SolidWorksFlowSimulation design system package was used. Results: We developed the method for designing and modeling hybrid power devices. It allows to obtain the speed fields of the heat carrier in the working channel of hybrid power devices. The online visualization of the results of numerical simulation makes the possibility of the complete and qualitative analysis of the results. Practical importance: The capabilities of the hydrodynamic modeling allow to obtain the velocity fields of the heat carrier in the working channel of the HED at the design and research of hybrid power devices. The online visualization of the results of numerical simulation makes the possibility of the visually represent the results of hydrodynamic calculation and the analyze of the studied processes. It plays the role of a tool, when we study and design modern engineering systems.

Keywords: Numerical modeling, hydrodynamic calculation, visualization, engineering analysis.

An urgent problem is the creation of new types of power devices that provide the possibility of energy-and resource saving, characterized by the possibility of economical and accurate maintenance of the specified operating parameters and meet modern requirements of electrical safety, reliability, and manufacturability and environmental friendliness.

The examples of such equipment are the hybrid energy devices (HED), which simultaneously perform the functions of electric heating of the heat carrier and its pumping. The HED provide the increased production efficiency and lower cost of the final product [1, 2].

The main advantages of the HED are significantly improved technical and economic indica-

tors, the ability to accurately control the power of electric heating directly at the place of consumption and output characteristics.

In the design of HED the main problem is the need to simultaneously account for electromagnetic, hydraulic and thermal processes. Therefore, it is advisable to use numerical methods [3], methods of experimental design and design using integrated CAD (CAD/CAE-systems) [4] to determine the optimal design parameters of the HED. These methods are considered a powerful tool for creating modern engineering systems and are widely used in solving problems of search design, optimization and modeling of complex physical processes. It allows to create a scientifically sound method for

designing the HED taking into account the simultaneous influence of factors of different nature on the temperature, efficiency and pressure of the heat carrier.

The particular interest is the use of CFD technologies in the design of the HED and performing hydrodynamic calculations. The SolidWorksFlow Simulation package has great capabilities for analyzing hydraulic processes. The SolidWorks system is one of the first design and analysis systems. It contains fully integrated tools for solving problems of hydraulic and gas dynamics and heat exchange.

The main advantages of SolidWorksFlowSimulation at modeling and research of the HED are:

- the use of the same environment for the design and analysis;
- the possibility to model stationary internal incompressible flow, account for forced convection, the turbulent and transient flow too:
- the choice of volume flow (at input) and the pressure (at output) as boundary conditions of the fixed wall:
- creating the calculation grid directly from the SolidWorks model, automatically plotting the calculation range and creating a grid in the solid and flow area, setting the calculation grid parameters to increase the accuracy of the calculation of the

heat transfer zone, accounting for rotating and stationary volumes;

- the definition of modeling goals (when we control the computational procedures) without stopping it;
- getting calculation results in the form of color diagrams on the plane or on a surface, getting 3D flow trajectories, the distributions of any characteristics along a curve; the animation of results, etc.

The modeling of hydrodynamic processes in the HED in the SolidWorksFlowSimulation environment is performed in the following stages:

- 1) the creation of a calculated parametric threedimensional model of the HED;
 - 2) establishing boundary conditions (Fig. 1);
- 3) the choice of models of physical phenomena occurring in liquid media;
 - 4) the choice of calculation method;
 - 5) the analysis of the calculation results.

After the hydrodynamic calculation of the HED the results of the calculation and visualization can be presented as [5]:

- the color plots in the section (Cut Plots);
- the color plots on the surface (Surface Plots);
- the isosurfaces (Isosurfaces);
- the visualization of fluid flow lines (Flow Trajectors);

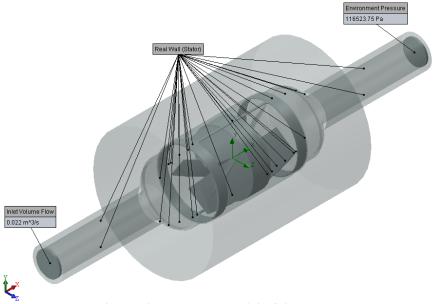


Fig. 1. The computer model of the HED

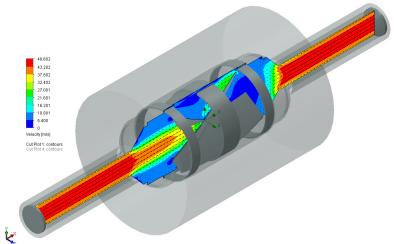


Fig. 2. The section plots: the velocity distribution in the longitudinal section of the HED (Contours, Vectors)

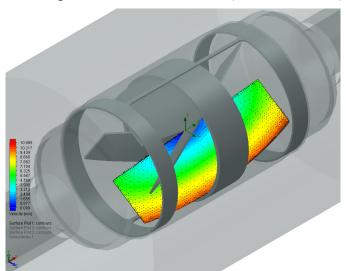


Fig. 3. Surface Plots: the speed distribution on the edge of the blade (Contours, Vectors)

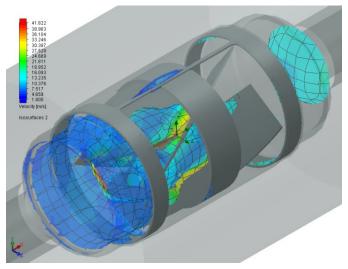


Fig. 4. Isosurfaces: the pressure level surfaces with speed values plotted on them in the color grid fill mode

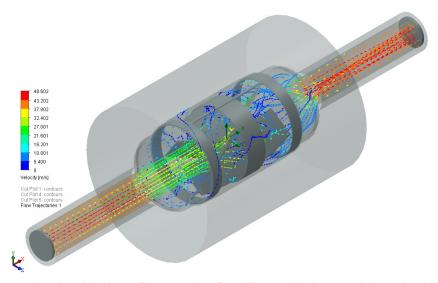


Fig. 5. The visualization of heat carrier flow lines with the speed plotted to them

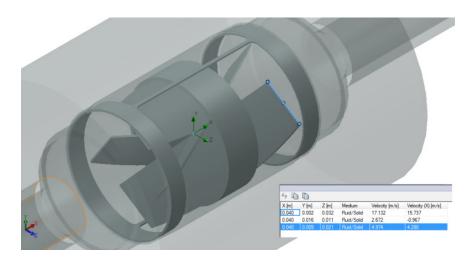


Fig. 6. Point Parameters: the speed values at three points at the blade output

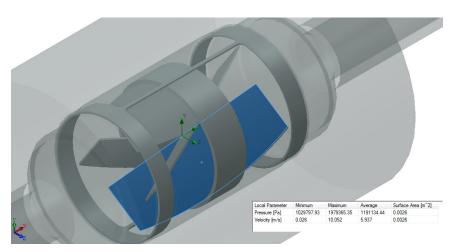


Fig. 7. Surface Parameters: the speed and pressure values on the blade face

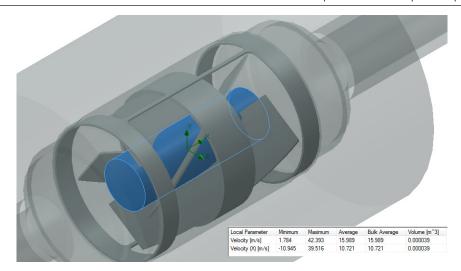


Fig. 8. Volume Parameters: the speed values in the studied volume

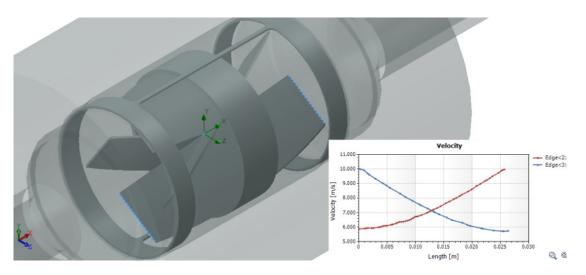


Fig. 9. XY Plots: the speed change along the blade edge at the blade input and output

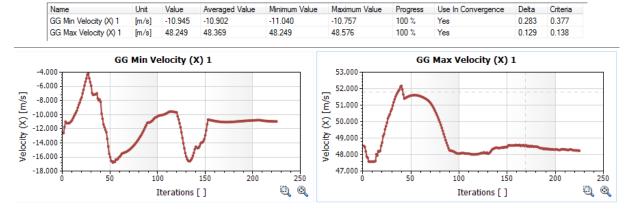


Fig. 10. Goal Plots: the minimum and maximum values of the speed axial component

- the parameter values at the point (Point Parameters);
- the parameter values on the surface (Surface Parameters);
- the parameter values in the volume (Volume Parameters);
 - the plots (XY Plots);
- the dependencies of the changes of the convergence goals (Goals);
 - the report (Report);
 - the movies (Animations).

Some possible variants of visualizing the results of the hydrodynamic calculation of the HED in the SolidWorksFlowSimulation environment are shown in Figures 2–10.

Using Cut Plots, we visualize the distribution of the heat carrier speed flow values in the cross section (Fig. 2). We show the distribution of parameters in the form of fills (Contours) and speed vectors (Vectors). The colors of the fills and vectors correspond to the speed distribution.

The distribution of the heat carrier flow speed values on the selected model surface (blade face) contacting with the fluid is visualized by Surface Plots (Fig. 3). The goal surface is selected directly on the model [6–11].

Isosurface illustrates a surface with a pressure value equal to a certain value at each point (Fig. 4). The colors of the level surfaces correspond to the pressure distribution on the isosurface.

Using Flow Trajectories we can build the heat carrier flow lines in the HED channel. The speed vector is directed tangentially to this line at each point of it (Fig. 5).

One of the effective methods of visualizing the results is the creation a movie of the heat carrier flow lines. This movie shows the distribution of the heat carrier in the consideration volume.

At the same time, using Point Parameters, we determine the values of the heat carrier speed within the design area at certain points specified at the output of the blade (Fig. 6).

With Surface Parameters we can determine the values of local physical parameters (pressure, temperature, speed, etc.) and integral physical parameters (heat carrier flow, forces, moments, etc.) on the selected surface. When we examine the HED the values of the heat carrier flow speed and the pressure on the edge of the blade are determined (Fig. 7).

We create the auxiliary bodies to calculate the average speed in the zones of heat exchange and heat transfer. When we calculate the average speed these auxiliary bodies are represented as the separate components and are taken as calculated volumes. Using the Volume Parameters tool we determine the average values of the axial component of the heat carrier speed in the studied volume (Fig. 8).

XY Plot allows you to see the change in physical parameters along the desired line. We can use any line defined by graphical tools as this line, for example, two-dimensional or three-dimensional drawings and curves. The change of the speed along the blade tips at the input and output of the blade is shown in Fig. 9.

We can control the change of the goal physical parameter during the calculation process with the Goal Plots visualization tool. When we study the HED, we select the minimum and maximum values of the speed axial component (Fig. 10) as the goal parameters.

Moreover, we can create a report about the performed calculation in Microsoft Word (Report). The report information can be included in an existing Word document or we can create a new document with this information using a standard template or the template desired by the user.

Particularly we should note the wide possibilities of SolidWorksFlowSimulation for creating movies (Animation) in order to visualize the picture of changing parameters in space and time. It is possible simultaneously to animate different pictures, the entire model (rotation, displacement, zoom) or the rotation of individual components of the model.

At the design and study of the HED the hydrodynamic modeling capabilities allow to obtain the speed fields of the heat carrier in the working channel of the HED. The online visualization of the results of numerical modeling makes the possibilities of the complete and qualitative analysis of the

results. The visualization allows both to visually represent the results of hydrodynamic calculation and to analyze the studied processes, i. e. plays the role of a tool used in the study and design of modern engineering systems.

References

- 1. Prikhodchenko O. V., Slushaninov N. N., Ivanov S. N., Shpilev M.A., Kim K. K. & Mikerov A. G. *Patent no. 2451430 RF, IPC N 05 V 6/10. Device for heating and pumping fluid.* Appl. 22.02.2011. Publ. 20.05.2012. Bull. no. 14 (In Russian)
- 2. Kim K. K. & Ivanov S. N. *Electromechanical generators of thermal energy.* Saarbrücken: LAP LAM-BERT, Academic Publ., 2011, 352 p. (In Russian)
- 3. Prikhodchenko O. V. Mathematical modeling and Analysis of electromagnetic and thermal processes in electromechanical heating converters. Scientific notes of the Komsomolsk-on-Amur State Technical University. Series III "Science of nature and technology", 2011, no. 1(7), pp. 27–37.
- 4. Prikhodchenko O. V., Prosolovich A. A. & Prikhodchenko I. A. Modeling of hermetic units of electromechanical pumping devices in the T-FLEX CAD system. *CAD and Computer graphics Journal*, 2012, no. 2, pp. 88–91. (In Russian)
- 5. Alyamovsky A.A., Sobachkin A.A., Odintsov E.V., Kharitonov A.I. & Ponomarev N.B. *SolidWorks 2007/2008. Computer modeling in engineering practice.* Saint Petersburg, BHV-Petersburg Publ., 2008. 1040 p. (In Russian)

- 6. *Hexagon*. Available at: http://www.mscsoftware.com (accessed: 17.01.2020).
- 7. Kim K. K. The stability of a synchronous machine with zero-flux stator winding to small radial disturbances. *Electrical Technology Russia*, 1999, iss. 4, pp. 66–77. (In Russian)
- 8. Kim K. K. On the problem of determining speed-torque characteristics of thermal electromechanical converters. *Russian Electrical Engineering*, 2009, vol. 80, iss. 8, pp. 459–465.
- 9. Ivanov S. N., Kim K. K. & Karpova I. M. Heat-generating electromechanical converter. *Russian Electrical Engineering*, 2008, vol. 79, iss. 9, pp. 508–513.
- 10. Kim K. I. & Kim K. K. Equations of a synchronous machine with electrodynamic suspension of the rotor. *Elektricity*, 1989, iss. 1, pp. 10–22.
- 11. Kim K. K., Karpova N. S. & Prickodchenko O. V. The analysis of the influence of constructional factors on the winding reliability of the heating electromechanical transducers. *Izvestiia Peterburgskogo universiteta putei soobshenii* [*Proceedings of Petersburg Transport University*]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2013, iss. 4, pp. 26–31.

Received: February 11, 2020 Accepted: February 18, 2020

Author's information:

Konstantin K. KIM – D. Sci. in Engineering, Professor; kimkk@inbox.ru

Sergey N. IVANOV – D. Sci. in Engineering, Professor; snivanov57@mail.ru

 $\label{lem:martin} Marat\ I.\ KHISMATULIN-Postgraduate\ Student; \\ lokomotivlar@gmail.com$

УДК 656.073: 658.8

Терминалистика – новая дисциплина в высшем транспортном образовании

О. Д. Покровская

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: *Покровская О. Д.* Терминалистика — новая дисциплина в высшем транспортном образовании // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2020.— Т. 17.— Вып. 2.— С. 177—197. DOI: 10.20295/1815-588X-2020-2-177-197

Аннотация

Цель: Характеристика терминалистики как новой учебной дисциплины. Актуальность ее разработки как нового методического обеспечения связана с введением в действие федерального государственного образовательного стандарта высшего образования 3-го поколения (ФГОС 3++) по специальности «Эксплуатация железных дорог». Терминалистика как учебный курс и новая методология транспортной науки заключается в изучении потоков, связанных с деятельностью объектов терминально-складской инфраструктуры – всех видов логистических объектов. В отличие от логистики в целом терминалистика не только детализирует природу потоков, но и определяет область исследования как только область деятельности логистических объектов, включая комплекс вопросов их рационального проектирования и эффективной эксплуатации, в связи с чем новая методология терминалистики является интегрированной, междисциплинарной и носит сквозной характер для дисциплин транспортного образования, в частности железнодорожного. Методы: Использованы следующие методы: аналитический, моделирования, логистики, общей теории систем, бережливого производства. Результаты: Разработано методическое обеспечение терминалистики как новой учебной дисциплины. В соответствии с требованиями ФГОС 3++ предложены тематический план и состав дисциплины, приведены основные результаты изучения дисциплины обучающимися, результаты по каждой осваиваемой компетенции, а также основная учебная литературы по данному курсу. Помимо общей характеристики терминалистики показаны ее межпредметные связи и междисциплинарное положение в системе учебных дисциплин образовательной программы. Практическая значимость: Преподавание новой учебной дисциплины по комплексному исследованию логистических объектов, терминальных сетей и транспортно-складских систем в целом приведет к совершенствованию принимаемых управленческих решений и позволит сформировать новую область прикладной транспортной науки – интеграции методов эффективной организации перевозок и работы объектов терминально-складской инфраструктуры с инструментами транспортной, экономической и логистической науки, т.е. дать выпускнику транспортного вуза инновационный набор уникальных профессиональных компетенций формата hard-skills.

Ключевые слова: Терминалистика, логистика терминалов и транспортных узлов, терминальная сеть, новая учебная дисциплина, профильное транспортное образование.

В связи с внедрением федерального государственного образовательного стандарта высшего образования 3-го поколения (ФГОС 3++) по специальности «Эксплуатация железных дорог» N 216 от 27 марта 2018 г. к выпускнику высших

учебных заведений транспорта предъявляются новые требования. В том числе это касается специализации «Транспортный бизнес и логистика» (квалификация выпускника — инженер путей сообщения).

Возникла объективная необходимость включения в основную образовательную программу новой дисциплины, изучение которой позволило бы обучающемуся овладеть компетенциями, предусмотренными $\Phi \Gamma OC 3 ++$.

Вышеизложенное дает возможность сформулировать цель исследования: охарактеризовать терминалистику – логистику терминалов и транспортных узлов – как новую учебную дисциплину. Для достижения цели решались следующие задачи.

Терминалистику предлагается определить как универсальный методологический инструмент для рационального проектирования, прогнозирования, эксплуатации и развития объектов логистической инфраструктуры. Логика словообразования термина «терминалистика» следующая. Для удобства применения термина предложен английский эквивалент понятия, т.е. производится интеграция понятий «Terminal» (от англ. τ ерминал) + logistics (от англ. τ логистика) = terminalistics – терминальная логистика, логистика инфраструктуры транспортно-логистических узлов и терминальных сетей (the infrastructural logistics of transport and logistical hubs and terminal networks) - логистика терминалов, транспортных узлов и терминальных сетей [1–3].

Терминалистика — наука об организации, проектировании, управлении, структуре и конфигурации сетей грузовых терминалов, включающая рассмотрение вопросов о количестве и дислокации узлов, функционально-технологическом составе, прогнозную и экспертную оценки с учетом потоковых процессов транспортно-технологического, экономического происхождения и связанного мультипликативного эффекта работы терминальных сетей [4–6].

Положение терминалистики как учебной дисциплины в системе междисциплинарных связей показано на рис. 1.

В наиболее простом, укрупненном, виде место терминалистики в системе профильного транспортного образования иллюстрирует рис. 2.

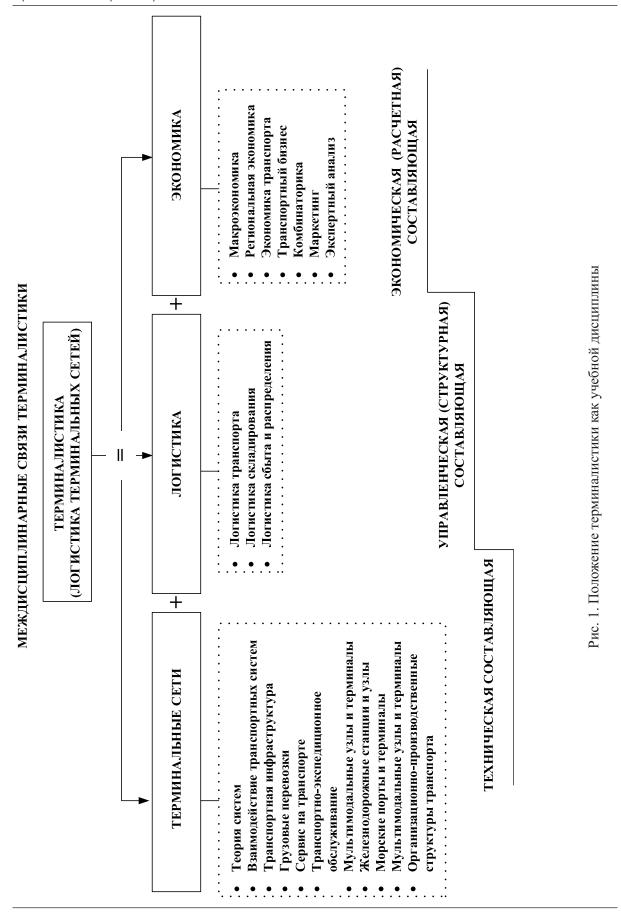
Рассмотрим место дисциплины в структуре основной профессиональной образовательной программы. Дисциплина «Логистика транспорт-

ных узлов и терминалов» (Б1.В.8) относится к части, формируемой участниками образовательных отношений блока 1 «Дисциплины (модули)».

Целью преподавания дисциплины является овладение обучающимися современными технологиями, используемыми на железнодорожном транспорте, по организации маркетинговых исследований для удовлетворения потребностей клиентов и эффективному проектированию и управлению транспортно-складскими системами и логистическими объектами, а также средствами и методами комплексной оценки, организации работы, проектирования и управления логистической (терминально-складской) инфраструктурой транспортных узлов и терминалов в рамках нового научного направления — терминалистики.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

- формирование знаний экономико-математических и технико-технологических основ логистики транспортных узлов, терминалов и терминальных сетей;
- формирование знаний о классификации и географии железнодорожных линий, грузопотоков железнодорожной сети;
- формирование знаний об организации бизнес-проектов при предоставлении клиентам транспортных услуг, максимально удовлетворяющих их потребности;
- формирование знаний основных принципов и процедур проектирования логистических объектов и терминально-складской инфраструктуры в транспортных узлах; технико-экономическое обоснование технических решений терминалов и логистической инфраструктуры транспортных узлов; анализ эволюции транспортных узлов; конфигурирование терминальных сетей;
- формирование принципов клиентоориентированности, цифровизации и стандартизации терминально-складской деятельности железнодорожного транспорта.
- формирование умений применить: классификацию и географию железнодорожных линий, мирового рынка в целом; выбор партнера при



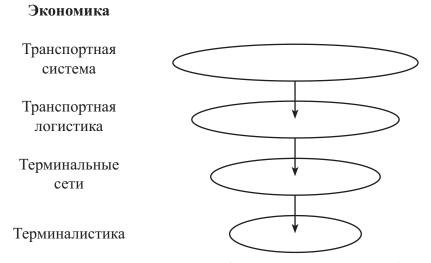


Рис. 2. Терминалистика в системе профильного транспортного образования

организации перевозки; анализ деятельности фирмы; современные формы реализации товара иностранному заказчику; выбор способа доставки в зависимости от объемов;

- приобретение навыков оформления международного контракта, международных систем кодирования информации о товарах, анализа производственных возможностей компании, материально-технического обеспечения, изучения жизненного цикла продукции и услуг, разработку путей их совершенствования, анализа структуры управления, уровня квалификации кадров, состояния научно-технического потенциала, финансовых возможностей;
- приобретение навыков программирования задач расчета параметров транспортных узлов, станций и их элементов, подбора типовых решений реконструкции путевого развития станции; выбора метода обоснования этапов и вариантов реконструкции;
- приобретение опыта разработки инновационных инструментов логистического нормирования, комплексной оценки;
- приобретение опыта разработки бизнеспроектов грузовых терминалов, развития терминально-складской инфраструктуры транспортных узлов, реконструкции или развития железнодорожных станций и узлов, основных этапов развития железнодорожных станций для удоразвития железнодорожных станций и удоразвития железнодорожных и удоразвития железнодорожных станций и удоразвития железнодорожных

влетворения их потребностей (составлено автором на основе анализа [7–14]).

Формирование новой учебной дисциплины связано со следующими обстоятельствами.

Актуальность новой методологии (более подробно теория и методология терминалистики изложены в работах [1-3, 15-44]) определена: отсутствием единого подхода к классификации, иерархии, идентификации объектов терминально-складской инфраструктуры – терминалов, транспортных узлов и терминальных сетей – с позиций логистики; усложнением ассортимента логистического сервиса и структуры цепей поставок с участием терминалов и транспортных узлов; быстрым ростом терминалов и расширением терминальной сети ОАО «РЖД»; усложнением взаимодействия участников процесса перевозки; недостаточными полнотой, интегрированностью и комплексностью исследований объектов терминально-складской инфраструктуры – терминалов, транспортных узлов и терминальных сетей (составлено автором на основе анализа отечественных и зарубежных работ [45-65]).

Область исследований терминалистики – увязать вопросы организации перевозок и работы объектов терминально-складской инфраструктуры (складов, грузовых терминалов и других логистических объектов) с примене-

нием методов и инструментов транспортной, экономической и логистической науки.

На основании вышеизложенного изобразим местоположение терминалистики и ее межпредметные связи как междисциплинарной системы знаний в общей системе дисциплин профильного транспортного образования по специальности «Эксплуатация железных дорог».

На рис. 3 показаны ближайшие от терминалистики «соты» — это ключевые научные знания, на которых основаны теоретическое и методологическое обеспечение терминалистики. «Краеугольными камнями» новой учебной дис-

циплины, на которых она базируется, являются общая теория систем, логистика, экономика и транспортная инфраструктура. Частные теории, используемые и интегрируемые терминалистикой, расположены по внешнему периметру.

В табл. 1 показано разграничение научных сфер логистики и терминалистики как по-новому очерченного поля транспортно-логистических исследований.

Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине связан с формированием у обучающихся следующих компетенций: ПК-6 (организация маркетинговых исследований для

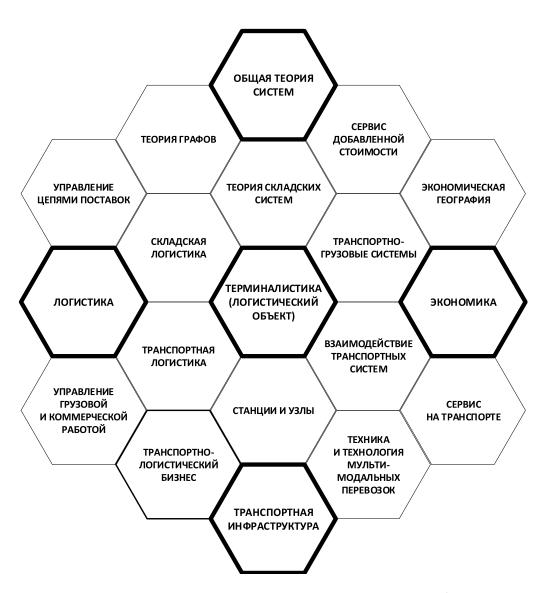


Рис. 3. Межпредметные связи и положение терминалистики в системе профильных дисциплин

ТАБЛИЦА 1. Разграничение научных сфер логистики и терминалистики

Логистика Терминалистика

Объект: материальные, финансовые, информационные, сервисные потоки (все виды потоков, без детализации субъекта их природы) Предмет: оптимизация потоков (одинаковый) Область исследований: широкий спектр вопросов управления потоковыми процессами без детализации объектов и их природы

Объект: потоки, связанные с деятельностью логистических объектов, порождаемые и преобразуемые ими (т. е. детализация природы – только область деятельности логистических объектов) Предмет: оптимизация потоков (одинаковый) Область исследований: ограничена вопросами рационального проектирования и эффективной эксплуатации ЛО

Терминалистика – это по-новому очерченное поле транспортно-логистических исследований

удовлетворения потребностей клиентов), ПК-8 (организация предоставления клиентам транспортных услуг, максимально удовлетворяющих их потребности).

Нами были разработаны содержание и структура дисциплины «Терминалистика». Примерный тематический состав дисциплины следующий:

Раздел 1.Терминалистика — логистика терминалов и транспортных узлов. Общие положения.

Раздел 2. Общие сведения о транспортноскладских системах: транспортных узлах, терминалах, терминальных сетях.

Раздел 3. Классификация и иерархия терминалов как логистических объектов железнодорожного транспорта.

Раздел 4. Классификация и иерархия логистических районов и логистических областей.

Раздел 5. Морфология терминальной сети, ее виды и характеристики.

Раздел 6. Эволюция транспортных узлов и терминально-складской инфраструктуры.

Раздел 7. Проектирование логистической инфраструктуры транспортного узла.

Раздел 8. Комплексная оценка железнодорожных транспортно-складских систем.

Предполагается, что объем дисциплины составит 3 зачетные единицы (108 ч), в том числе:

- для очной формы обучения:
- лекции 32 ч,

- практические занятия 16 ч,
- самостоятельная работа 24 ч,
- контроль -36 ч,
- форма контроля знаний экзамен;
- для заочной формы обучения:
- лекции 8 ч,
- практические занятия 8 ч,
- самостоятельная работа 83 ч,
- контроль 9 ч,
- форма контроля знаний экзамен.

Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесенных с установленными в программе специалистета индикаторами достижения компетенций представлен в табл. 2.

Разделы дисциплины и содержание рассматриваемых вопросов по формам обучения даны в табл. 3 и 4, разделы дисциплины и виды занятий — в табл. 5.

Рекомендуемая учебная литература приведена в работах [2, 3, 14, 66–77].

Предусматривается также дистанционный курс обучения по терминалистике, а также специальный учебный курс по программам повышения квалификации работников ОАО «РЖД». В дальнейшем планируется открытие авторского класса по вопросам логистики терминалов, транспортных узлов и терминальных сетей.

Вышеизложенное позволяет прийти к следующему выводу. Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I как первое транспортное высшее

ТАБЛИЦА 2. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине «Терминалистика»

Индикаторы достижения компетенций	Результаты обучения по дисциплине				
ПК-6. Организация маркетинговых исследований для удовлетворения потребностей клиентов					
ПК-6.1.4. Классификация и география железнодорожных линий, грузопотоки железнодорожной сети	Обучающийся знает: классификацию и географию железнодорожных линий, грузопотоки железнодорожной сети; экономико-математические и техникотехнологические основы логистики транспортных узлов, терминалов и терминальных сетей				
ПК-6.2.4. Применение знаний клас- сификации и географии железно- дорожных линий, мирового рынка в целом; выбор партнера при орга- низации перевозки; анализ деятель- ности фирмы; современные формы реализации товара иностранному заказчику; выбор способа доставки в зависимости от объемов	Обучающийся умеет: применить знания классификации и географии железнодорожных линий, мирового рынка в целом; выбрать партнера при организации перевозки; проанализировать деятельность фирмы; знать современные формы реализации товара иностранному заказчику; выбрать способ доставки в зависимости от объемов				
ПК-6.3.4. Навыки в оформлении международного контракта, международных систем кодирования информации о товарах; анализ производственных возможностей компании, материально-технического обеспечения; изучение жизненного цикла продукции и услуг, разработка путей их совершенствования; анализ структуры управления, уровня квалификации кадров, состояния научно-технического потенциала, финансовых возможностей	Обучающийся владеет: навыками в оформлении международного контракта, международных систем кодирования информации о товарах, анализом производственных возможностей компании, материально-технического обеспечения, изучением жизненного цикла продукции и услуг, разработкой путей их совершенствования, анализом структуры управления и уровня квалификации кадров, состояния научно-технического потенциала, финансовых возможностей				
ПК-8. Организация предоставления к ряющих их потребности	лиентам транспортных услуг, максимально удовлетво-				
ПК-8.1.1. Организация бизнес- проектов при предоставлении клиентам транспортных услуг, мак- симально удовлетворяющих их по- требности	Обучающийся знает: организацию бизнес-проектов при предоставлении транспортных услуг клиентам, максимально удовлетворяющих их потребности; основные принципы и процедуры проектирования логистических объектов и терминально-складской инфраструктуры в транспортных узлах; технико-экономическое обоснование технических решений терминалов и логистической инфраструктуры транспортных узлов; анализ эволюции транспортных узлов; конфигурирование терминальных сетей; принципы клиентоориентированности, цифровизации и стандартизации терминально-складской деятельности железнодорожного транспорта				

Окончание табл. 2

Индикаторы достижения компетенций	Результаты обучения по дисциплине
ПК-8.2.1. Умение разрабатывать бизнес-проекты грузовых терминалов, характеризовать развитие терминально-складской инфраструктуры транспортных узлов, реконструкции или развития железнодорожных станций и узлов; определять основные этапы развития железнодорожных станций для удовлетворения их потребностей	Обучающийся умеет: разрабатывать бизнес-проекты грузовых терминалов, терминально-складскую инфраструктуру транспортных узлов, реконструкции или развития железнодорожных станций и узлов; определять основные этапы развития железнодорожных станций для удовлетворения их потребностей; разрабатывать инновационные инструменты логистического нормирования и комплексной оценки
ПК-8.3.1. Навыки программирования задач расчета параметров транспортных узлов, станций и их элементов, подбора типовых решений реконструкции путевого развития станции; выборе метода обоснования этапов и вариантов реконструкции	Обучающийся владеет: навыками программирования задач расчета параметров транспортных узлов, станций и их элементов, подбора типовых решений реконструкции путевого развития станции, выбора метода обоснования этапов и вариантов реконструкции

ТАБЛИЦА 3. Разделы дисциплины и содержание разделов для очной формы обучения

№ п/п	Наименование раздела дисциплины	Содержание раздела	Индикаторы достижения компетенций
1	Терминалистика – логистика терминалов и транспортных узлов. Общие положения	Роль объектов терминально-складской инфраструктуры в транспортной и экономической системах страны. Анализ отечественного рынка транспортно-логистических услуг. Общая характеристика теории и методологии терминалистики. Концептуальные подходы терминалистики к исследованию транспортно-складских систем	ПК-6.1.4, ПК-6.2.4, ПК-6.3.4, ПК-8.1.1, ПК-8.2.1, ПК-8.3.1
2	Общие сведения о транспортно-складских системах: транспортных узлах, терминалах, терминальных сетях	Свойства и принципы функционирования транспортно-складских систем. Общие сведения и параметрические ряды логистических объектов: транспортных узлах, терминалах, терминальных сетях	ПК-6.1.4, ПК-6.2.4, ПК-6.3.4, ПК-8.1.1, ПК-8.2.1, ПК-8.3.1
3	Классификация и иерар- хия терминалов как логистических объек- тов железнодорожного транспорта	Классификация, иерархия и параметрические ряды логистических объектов. Функциональные характеристики логистических объектов	ПК-6.1.4, ПК-6.2.4, ПК-6.3.4, ПК-8.1.1, ПК-8.2.1, ПК-8.3.1

Окончание табл. 3

<u>№</u> п/п	Наименование раздела дисциплины	Содержание раздела	Индикаторы достижения компетенций
4	Классификация и иерар- хия логистических райо- нов и логистических областей	Классификация, иерархия и параметрические ряды логистических районов и логистических областей. Их функциональные характеристики и общие принципы их проектирования, эволюции, оценки	ПК-6.1.4, ПК-6.2.4, ПК-6.3.4, ПК-8.1.1, ПК-8.2.1, ПК-8.3.1
5	Морфология терминальной сети, ее виды и характеристики	Функционально-логистический подход к формированию терминальной сети. Морфология терминальной сети, ее виды и характеристики. Принципы и этапы ее конфигурирования. Параметры работы терминальной сети. Типология терминальной сети и ее структуры	ПК-6.1.4, ПК-6.2.4, ПК-6.3.4, ПК-8.1.1, ПК-8.2.1, ПК-8.3.1
6	Эволюция транспортных узлов и терминально- складской инфраструктуры	Эволюция транспортных узлов и терминально- складской инфраструктуры. Функционально- логистический подход к исследованию транспортно-складских систем. Исследование состояний транспортно-складских систем в про- цессе их генезиса и эволюции	ПК-6.1.4, ПК-6.2.4, ПК-6.3.4, ПК-8.1.1, ПК-8.2.1, ПК-8.3.1
7	Проектирование логи- стической инфраструк- туры транспортного узла	Экономико-математические модели проектирования логистических объектов. Проектирование логистической инфраструктуры транспортного узла. Принципы, этапы, методики проектирования логистических объектов	ПК-6.1.4, ПК-6.2.4, ПК-6.3.4, ПК-8.1.1, ПК-8.2.1, ПК-8.3.1
8	Комплексная оценка железнодорожных транспортно-складских систем	Система логистического нормирования показателей работы транспортно-складских систем железнодорожного транспорта, общие сведения. Принципы и состав системы логистического нормирования. Ключевые индикаторы эффективности работы железнодорожных транспортноскладских систем	ПК-6.1.4, ПК-6.2.4, ПК-6.3.4, ПК-8.1.1, ПК-8.2.1, ПК-8.3.1

учебное заведение России был и остается инициатором инновационных форматов отраслевого образования.

Можно полагать, что преподавание данной учебной дисциплины по комплексному исследованию логистических объектов, терминальных сетей и транспортно-складских систем в целом позволит совершенствовать принимаемые управленческие решения и сформировать

новую область прикладной транспортной науки — область интеграции методов эффективной организации перевозок и работы объектов терминально-складской инфраструктуры с инструментами транспортной, экономической и логистической науки, т.е. дать выпускнику транспортного вуза инновационный набор уникальных профессиональных компетенций формата hard-skills.

ТАБЛИЦА 4. Разделы дисциплины и содержание разделов для заочной формы обучения

№ π/π	Наименование раздела дисциплины	Содержание раздела	Индикаторы достижения компетенций
1	Терминалистика — логистика терминалов и транспортных узлов. Общие положения. Общие сведения о транспортно-складских системах: транспортных узлах, терминалах, терминальных сетях	Роль объектов терминально-складской инфраструктуры в транспортной и экономической системах страны. Анализ отечественного рынка транспортно-логистических услуг. Общая характеристика теории и методологии терминалистики. Концептуальные подходы терминалистики к исследованию транспортно-складских систем. Свойства и принципы функционирования транспортно-складских систем. Общие сведения и параметрические ряды логистических объектов: транспортных узлов, терминалов, терминальных сетей	ПК-6.1.4, ПК-6.2.4, ПК-6.3.4, ПК-8.1.1, ПК-8.2.1, ПК-8.3.1
2	Классификация и иерархия терминалов как логистических объектов железнодорожного транспорта. Классификация и иерархия логистических районов и логистических областей. Морфология терминальной сети, ее виды и характеристики	Классификация, иерархия и параметрические ряды логистических объектов. Функциональные характеристики логистических объектов. Классификация, иерархия и параметрические ряды логистических районов и логистических областей, их функциональные характеристики и общие принципы их проектирования, эволюции, оценки. Функционально-логистический подход к формированию терминальной сети. Морфология терминальной сети, ее виды и характеристики. Принципы и этапы ее конфигурирования. Параметры работы терминальной сети. Типология терминальной сети и ее структуры	ПК-6.1.4, ПК-6.2.4, ПК-6.3.4, ПК-8.1.1, ПК-8.2.1, ПК-8.3.1
3	Эволюция транспортных узлов и терминально- складской инфраструктуры	Эволюция транспортных узлов и терминально- складской инфраструктуры. Функционально- логистический подход к исследованию транспортно-складских систем. Исследование состояний транспортно-складских систем в процессе их генезиса и эволюции. Экономико- математические модели проектирования логисти- ческих объектов	ПК-6.1.4, ПК-6.2.4, ПК-6.3.4, ПК-8.1.1, ПК-8.2.1, ПК-8.3.1
4	Проектирование логистической инфраструктуры транспортного узла. Комплексная оценка железнодорожных транспортно-складских систем	Проектирование логистической инфраструктуры транспортного узла. Принципы, этапы, методики проектирования логистических объектов. Система логистического нормирования показателей работы транспортно-складских систем железнодорожного транспорта, общие сведения. Принципы и состав системы логистического нормирования. Ключевые индикаторы эффективности работы железнодорожных транспортно-складских систем	ПК-6.1.4, ПК-6.2.4, ПК-6.3.4, ПК-8.1.1, ПК-8.2.1, ПК-8.3.1

ТАБЛИЦА 5. Разделы дисциплины и виды занятий для очной формы обучения

№ п/п	Наименование раздела дисциплины	Л	ПЗ	ЛР	СРС	Всего
1	Терминалистика – логистика терминалов и транспортных узлов. Общие положения	4	2		3	9
2	Общие сведения о транспортно-складских системах: транспортных узлах, терминалах, терминальных сетях	4	2		3	9
3	Классификация и иерархия терминалов как логистических объектов железнодорожного транспорта	4	2		3	9
4	Классификация и иерархия логистических районов и логистических областей	4	2		3	9
5	Морфология терминальной сети, ее виды и характеристики	4	2		3	9
6	Эволюция транспортных узлов и терминально- складской инфраструктуры	4	2		3	9
7	Проектирование логистической инфраструктуры транспортного узла	4	2		3	9
8	Комплексная оценка железнодорожных транспортноскладских систем	4	2		3	9
Итого 32 16 24					72	
Контроль					36	
Всего (общая трудоемкость, ч)					108	

 Π р и м е ч а н и я : Π – лекции, Π 3 – практические занятия, Π P – лабораторные работы, CPC – самостоятельная работа студента.

ТАБЛИЦА 6. Разделы дисциплины и виды занятий для заочной формы обучения

№ п/п	Наименование раздела дисциплины	Л	ПЗ	ЛР	СРС	Всего
1	Терминалистика – логистика терминалов и транспортных узлов. Общие положения. Общие сведения о транспортно-складских системах: транспортных узлах, терминалах, терминальных сетях	2	2		20	24
2	Классификация и иерархия терминалов как логистических объектов железнодорожного транспорта. Классификация и иерархия логистических районов и логистических областей. Морфология терминальной сети, ее виды и характеристики	2	2		20	24
3	Эволюция транспортных узлов и терминально- складской инфраструктуры	2	2		20	24
4	Проектирование логистической инфраструктуры транспортного узла. Комплексная оценка железнодорожных транспортно-складских систем	2	2		23	27
Итого 8 8 83					99	
Контроль					9	
Всего (общая трудоемкость, ч)				108		

Библиографический список

- 1. Покровская О. Д. Терминалистика : общие вопросы : монография / О. Д. Покровская. Казань : Бук, 2016. 142 с.
- 2. Покровская О. Д. Терминалистика: общие вопросы: монография / О. Д. Покровская, Р. В. Федоренко. Казань: Бук, 2020. 168 с.
- 3. Покровская О. Д. Логистическое руководство: математические основы терминалистики, маркировка, классификация и идентификация логистических объектов железнодорожного транспорта 2-е изд., испр.и доп. / О. Д. Покровская, Р. В. Федоренко. Казань: Бук, 2020. 290 с.
- 4. Покровская О. Д. Логистическое руководство: математические основы терминалистики, маркировка, классификация и идентификация логистических объектов железнодорожного транспорта / О. Д. Покровская. Казань: Бук, 2017. 281 с.
- 5. Экономика России : прошлое, настоящее, будущее : колл. монография / под общ. ред. Н. А. Адамова. М. : Ин-т исследования товародвижения и конъюнктуры оптового рынка, 2014. 248 с.
- 6. Titova T. S. Lifetime of earth dams / T. S. Titova, A. Longobardi, R. G. Akhtyamov, E. S. Nasyrova // Инженер.-строит. журн. 2017. № 1 (69). С. 34–43.
- 7. Ефремов В. А. Логистизация управления движением поездов / В. А. Ефремов, П. В. Куренков // Логистика сегодня. -2004. $-N_2$ 5. C. 31–38.
- 8. Куренков П.В. Синхромодальные перевозки и тримодальные терминалы как перспективные направления развития логистических технологий / П.В. Куренков, Д.А. Преображенский, А.В. Астафьев, Д.Г. Кахриманова, С.А. Волкова // Транспорт: наука, техника, управление. 2018. № 11. С. 13–17.
- 9. Куренков П. В. Перспективные направления развития политранспортной логистики / П. В. Куренков, Д. А. Преображенский, А. В. Астафьев, А. А. Сафронова, Д. Г. Кахриманова // Железнодорожный транспорт. -2019. -№ 3. C. 36–41.
- 10. Полянский Ю. А. Дорожный центр ситуационного управления: проблемы создания и функционирования / Ю. А. Полянский, П. В. Куренков // Экономика железных дорог. -2003. -№ 1. C. 51–65.
- 11. Полянский Ю. А. Топологическое моделирование взаимодействия хозяйств железной доро-

- ги / Ю. А. Полянский, П. В. Куренков // Транспорт : наука, техника, управление. 2003. № 7. С. 8–18.
- 12. Бубнова Г.В. Транспортные коридоры и оси в евразийских коммуникациях / Г.В. Бубнова, А.А. Зенкин, П.В. Куренков // Логистика евразийский мост: Материалы 12-й Междунар. науч.-практич. конференции. Красноярск: КрасГАУ. 2017. С. 25–33.
- 13. Быкадоров С. А. Анализ методов определения себестоимости грузовых перевозок / С. А. Быкадоров, П. В. Куренков, А. В. Серкова, О. В. Чиркова // Вестн. транспорта. -2014.-N 3. C. 30–41.
- 14. Щербаков В. В. Логистика и управление цепями поставок: учебник для академ. бакалавриата / В. В. Щербаков. М.: Юрайт, 2015. 582 с.
- 15. Покровская О. Д. Эволюционно-функциональный подход к развитию транспортных узлов / О. Д. Покровская // Политранспортные системы: Материалы IX Междунар. науч.-технич. конференции. Новосибирск: Сиб. гос. ун-т путей сообщения, 2017. С. 233–238.
- 16. Самуйлов В.М. Концепция «Новый шелковый путь» (Китай, Россия, Германия) / В.М. Самуйлов, О.Д. Покровская, Ц. Цун // Инновационный транспорт. $-2017.- \mathbb{N} \ 4 \ (26). \mathbb{C}. \ 26-28.$
- 17. Маликов О.Б. Анализ системы нормирования на железнодорожном транспорте с позиций клиентоориентированности / О.Б. Маликов, О.Д. Покровская // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2017. Т. 14. Вып. 2. С. 187–199.
- 18. Покровская О. Д. Комплексная оценка транспортно-складских систем железнодорожного транспорта: дис. на соискание учен. степени д-ра техн. наук / О. Д. Покровская. СПб.: ПГУПС, 2018. 377 с.
- 19. Покровская О. Д. Эволюционно-функциональный подход к классификации транспортных узлов / О. Д. Покровская, О. Б. Маликов // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. СПб. : ПГУПС, 2017. Т. 14. Вып. 3. С. 406—419.
- 20. Pokrovskaya O. Evolutionary-functional approach to transport hubs classification / O. Pokrovskaya, R. Fedorenko // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2019. N 982. P. 356–365.
- 21. Pokrovskaya O. Terminalistics as the methodology of integrated assessment of transportation and warehousing systems / O. Pokrovskaya // Web of Conferences 10.

- 10th International Scientific and Technical Conference «Polytransport Systems», PTS 2018. 2019. P. 2–14.
- 22. Pokrovskaya O. Assessment of transport and storage systems / O. Pokrovskaya, R. Fedorenko // VIII International Scientific Siberian Transport Forum. Trans-Siberia 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol. 1115 / eds by Z. Popovic, A. Manakov, V. Breskich. Cham: Springer, 2019. P. 570–577.
- 23. Pokrovskaya O. Methods of rating assessment for terminal and logistics complexes / O. Pokrovskaya, R. Fedorenko // VIII International Scientific Siberian Transport Forum. TransSiberia 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol. 1116 / eds by Z. Popovic, A. Manakov, V. Breskich. Cham: Springer, 2019. P. 950–959.
- 24. Покровская О. Д. Междисциплинарное положение теории терминалистики / О. Д. Покровская, Т. С. Титова // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2018. Т. 15. Вып. 2. С. 248—260.
- 25. Покровская О. Д. Логистика терминалов: перспективное направление логистики / О. Д. Покровская, Е. К. Коровяковский // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2015. Вып. 3 (44). С. 155—164.
- 26. Покровская О. Д. Терминалистика организация и управление в транспортных узлах / О. Д. Покровская, Е.К. Коровяковский // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2016. Вып. 4 (49). С. 509—520.
- 27. Покровская О. Д. Вопросы логистической иерархии железнодорожных объектов / О. Д. Покровская, О. Б. Маликов // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2016. Вып. 4 (49). С. 521—531.
- 28. Покровская О. Д. Организация транспортноскладских систем / О. Д. Покровская, Т. С. Титова // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. СПб. : ПГУПС, 2018. Т. 15. Вып. 3. С. 327—343.
- 29. Покровская О. Д. Инструментарий логистического нормирования для проведения аудита транспортно-складских систем / О. Д. Покровская, Т. С. Титова // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2019. Т. 16. Вып. 2. С. 175—190.
- 30. Покровская О. Д. Классификация узлов и станций как компонентов транспортной логистики / О. Д. Покровская // Вестн. транспорта Поволжья. -2016. № 5 (59). С. 77—86.

- 31. Покровская О.Д. Классификация объектов железнодорожной терминально-складской инфраструктуры / О.Д. Покровская // Вестн. Урал. гос. ун-та путей сообщения. 2017. № 1 (33). С. 70–83.
- 32. Покровская О. Д. Классификация, иерархия и идентификация объектов терминально-складской инфраструктуры / О. Д. Покровская, О. Б. Маликов // Транспорт : наука, техника, управление. -2017. № 8. С. 13–22.
- 33. Покровская О. Д. Исследование эволюции транспортных узлов как логистических объектов / О.Д. Покровская // Изв. Транссиба. 2017. № 2 (30). С. 115–123.
- 34. Покровская О. Д. Методика построения сетевого графа структуры логистического объекта / О. Д. Покровская, О. Б. Маликов // Мир транспорта. -2017. -№ 3. C. 79–82.
- 35. Покровская О. Д. Функционально-логистический подход к классификации транспортных узлов / О. Д. Покровская // Транспорт : наука, техника, управление. 2018. N = 4. C. 25-31.
- 36. Покровская О. Д. О терминологии объектов терминально-складской инфраструктуры / О. Д. Покровская // Мир транспорта. -2018. Т. 16. № 1 (74). С. 152—163.
- 37. Покровская О. Д. Понятийный аппарат теории терминалистики / О. Д. Покровская // Транспорт: наука, техника, управление. 2018. № 6. С. 31–37.
- 38. Покровская О. Д. Логистическая классность железнодорожных станций / О. Д. Покровская // Вестн. Урал. гос. ун-та путей сообщения. 2018. № 2 (38). С. 68—76.
- 39. Покровская О. Д. Методика и особенности идентификации логистических объектов железнодорожного транспорта / О. Д. Покровская // Вестн. Урал. гос. ун-та путей сообщения. 2018. № 3 (39). С. 56–67.
- 40. Покровская О. Д. Идентификация объектов терминально-складской инфраструктуры железнодорожного транспорта / О. Д. Покровская // Транспорт: наука, техника, управление. 2018. № 10. С. 19—25.
- 41. Покровская О. Д. Клиентоориентированность и цифровизация терминально-логистической деятельности / О. Д. Покровская // Железнодорожный транспорт. $2019. N \cdot 5. C. 9-16.$

- 42. Покровская О. Д. Комплексная оценка транспортно-складских систем / О. Д. Покровская // Железнодорожный транспорт. -2019. № 7. С. 26–32.
- 43. Покровская О. Д. Характеристика терминалистики как логистики терминалов / О. Д. Покровская // Транспорт : наука, техника, управление. $2019.- \mathbb{N} \cdot 4.- \mathbb{C}.34-41.$
- 44. Amrani A. E. The impact of international logistics parks on global supply chains / A. E. Amrani. Cambridge MA: Massachusetts Institute of Technology, 2007. 62 p.
- 45. Boile M. Feasibility of Freight Villages in the NYMTC Region / M. Boile, S. Theofanis, A. Strauss-Wieder. New York: The State University of New Jersey, 2011. 119 p.
- 46. Cassone G. C. Models of intermodal node representation / G. C. Cassone // European Transport. 2010. N 46. P. 72–85.
- 47. Erkayman B. A fuzzy topsis approach for logistics center location selection / B. Erkayman, E. Gundogar, G. Akkaya, M. Ipek // Journal of Business Case Studies (Turkey). -2011.-N 3. -P. 49–55.
- 48. Апатцев В. И. Железнодорожные станции и узлы: учебник / В. И. Апатцев, Ю. И. Ефименко, Н. В. Правдин и др.; под ред. В. И. Апатцева и Ю. И. Ефименко. М.: Учеб.-метод. центр по образованию на ж.-д. транспорте, 2014. 855 с.
- 49. Бауэрсокс Д. Дж. Логистика: интегрированная цепь поставок / Д. Дж. Бауэрсокс, Д. Дж. Клос; пер. с англ. М.: Олимп-Бизнес, 2006. 640 с.
- 50. Васильев С. Н. Стратегические направления долгосрочного развития транспортной инфраструктуры Сибири и Дальнего Востока: колл. монография / С. Н. Васильев; под науч. ред. С. Н. Васильева, С. С. Гончаренко, В. А. Персианова и др. Иркутск: ИрГУПС, 2009. 524 с.
- 51. Вельможин А.В. Теория транспортных процессов и систем / А.В. Вельможин, В.А. Гудков, Л.Б. Миротин. М.: Транспорт, 2000. 167 с.
- 52. Вентцель Е. С. Исследование операций. Задачи, принципы, методология / Е. С. Вентцель. М. : Дрофа, 2004. 208 с.
- 53. Волгин В. В. Склад: организация, управление, логистика / В. В. Волгин. М.: Издат.-торг. корпорация «Дашков и Ко», 2004. 736 с.

- 54. Глухов В. В. Математические методы и модели для менеджмента / В. В. Глухов, М. Д. Медников, С. Б. Коробко. СПб. : Лань, 2000. 480 с.
- 55. Гранберг А. Г. Основы региональной экономики / А. Г. Гранберг. М. : Издат.-торг. корпорация «Дашков и Ко», 2001.-492 с.
- 56. Вакуленко С. П. Конкуренция между магистралями направления «Север Юг» / С. П. Вакуленко, П. В. Куренков, А. С. Элларян, А. В. Астафьев, А. А. Сечкарев // Конкурентоспособность в глобальном мире: экономика, наука, технологии. 2016.— № 9-2 (24). С. 23-30.
- 57. Вакуленко С.П. Интермодальные и мультимодальные перевозки в транспортных коридорах Европы и Азии / С.П. Вакуленко, П.В. Куренков // Железнодорожный транспорт. 2016. № 6. С. 73—77.
- 58. Маликов О.Б. Классификация и оценка критериев эффективности транспортного коридора / О.Б. Маликов, М.А. Зачек // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. СПб. : ПГУПС, 2008. Вып. 3. С. 163—177.
- 59. Маликов О. Б. Грузовые терминалы в системе организации поездопотоков / О. Б. Маликов // Железнодорожный транспорт. -2011.- № 9.- C. 74-76.
- 60. Маликов О. Б. Деловая логистика / О. Б. Маликов. СПб. : Политехника, 2003. 223 с.
- 61. Маликов О. Б. Контейнерные терминалы : устройство, оборудование, проектирование, исследования / О. Б. Маликов. Саарбрюкен, Германия : LAMBERT Academic Publishing, 2014. 257 с.
- 62. Маликов О. Б. Определение маршрута транспортного коридора в сети / О. Б. Маликов // Актуальные проблемы управления перевозочным процессом : сб. науч. трудов. СПб. : ПГУПС, 2013. С. 97–105.
- 63. Маликов О.Б. Склады и грузовые терминалы / О.Б. Маликов. СПб. : Бизнес-Пресса, 2005. 648 с.
- 64. Маликов О. Б. Теория складских систем / О. Б. Маликов // Интегрированная логистика. -2012. № 6. С. 36–39.
- 65. Николашин В. М. Логистические транспортногрузовые системы: учебник / В. М. Николашин, В. И. Апатцев, С. Б. Левин и др.; под ред. В. М. Николашина. М.: Академия, 2003. 304 с.

- 66. Маликов О. Б. Перевозки и складирование товаров в цепях поставок : монография / О. Б. Маликов. М. : Учеб.-метод. центр по образованию на ж.-д. транспорте, 2014. 536 с.
- 67. Киричок А. Проектирование транспортноскладских комплексов / А. Киричок. М.: LAMBERT Academic Publ., 2014. 344 с.
- 68. Логистическое управление грузовыми перевозками и терминально-складской деятельностью: учебник для вузов / под ред. С.Ю. Елисеева, В.М. Николашина, А.С. Синицыной. М.: Учеб.-метод. центр по образованию на ж.-д. транспорте, 2013. 427 с.
- 69. Николашин В. М. Координационно-логистические центры : учеб. пособие / В. М. Николашин [и др.] ; под ред. В. М. Николашина, С. Ю. Елисеева. М. : Учеб.-метод. центр по образованию на ж.-д. транспорте, 2013.-228 с.
- 70. Экономика железнодорожного транспорта : учебник / под ред. Н. П. Терёшиной, Б. М. Лапидуса. М. : Учеб.-метод. центр по образованию на ж.-д. транспорте, 2011.-676 с.
- 71. Миротин Л.Б. Логистика, технология, проектирование складов, транспортных узлов и терминалов / Л.Б. Миротин, А.В. Бульба, В.А. Демин. Ростов-н./Д.: Феникс, 2009.—408 с.
- 72. Шубко В. Г. Железнодорожные станции и узлы / В. Г. Шубко ; под ред. В. Г. Шубко, Н. В. Правдина. М. : МПС РФ, 2002. 368 с.

- 73. Правдин Н. В. Проектирование инфраструктуры железнодорожного транспорта (станции, железнодорожные и транспортные узлы) / Н. В. Правдин, С. П. Вакуленко, А. К. Головнич и др.; под ред. Н. В. Правдина, С. П. Вакуленко. М.: Учеб.-метод. центр по образованию на ж.-д. транспорте, 2012. 1086 с.
- 74. Николашин В. М. Сервис на транспорте / В. М. Николашин. М.: Маршрут, 2011. 272 с.
- 75. Журавлев Н. П. Транспортно-грузовые системы: учебник для вузов ж.-д. транспорта / Н. П. Журавлев, О. Б. Маликов. М.: Маршрут, 2011. 366 с.
- 76. Покровская О. Д. Организация работы складской распределительной системы : учеб. пособие / О. Д. Покровская. Новосибирск : Центр развития научного сотрудничества, 2015. 72 с.
- 77. Покровская О. Д. Организация международной доставки груза через распределительный центр: учеб. пособие / О. Д. Покровская. Новосибирск: Центр развития научного сотрудничества, 2015. 102 с.

Дата поступления: 23.03.2020 г. Решение о публикации: 30.03.2020 г.

Контактная информация:

ПОКРОВСКАЯ Оксана Дмитриевна – д-р техн. наук, доцент; insight1986@inbox.ru

Terminalistics as a new discipline in higher transport education

O. D. Pokrovskaya

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: *Pokrovskaya O. D.* Terminalistics as a new discipline in higher transport education. *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2020, vol. 17, iss. 2, pp. 177–197. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2020-2-177-197

Summary

Objective: Describe terminalistics as a new academic subject. The relevance of its development as a new methodology is linked to enactment of the federal state educational standard for 3rd generation higher education (FGOS 3++) for the "Railway Operation" specialisation. Terminalistics as a new educational course and a new methodology of transport science consists of a study of flows related to the operation of all sorts of logistical objects of terminal and warehousing infrastructure. Terminalistics is distinguished

from logistics in general not only by detailing the nature of flows but also by defining the study area as only the area of operation of logistical objects, including the set of issues of their rational design and efficient operation, due to which the new methodology of terminalistics is integrated, inter-disciplinary, and has cross-cutting concerns with transport education disciplines, in particular railway education. Methods: Analytical, modelling, logistical, general systems theory, lean management methods were used. **Results:** Methodological support for terminalistics as a new academic discipline was developed. In accordance with FGOS 3++ requirements, a syllabus and course structure of the discipline were proposed, and main results of the study of the discipline by students, results for every skill set utilised and primary course materials were outlined. In addition to general characteristics of terminalistics, its cross-curricular links and inter-disciplinary position in the system of academic disciplines of the educational programme were shown. Practical importance: Teaching of a new academic discipline in complex research of logistical objects, terminal networks and transport and warehousing systems in general will lead to perfecting managerial decisions and allow formulating a new field of applied transport science integrating the methods of efficient organization of transportation and work of terminals and warehousing infrastructure with instruments of transport, economic and logistical science, thus providing a graduate of a transport higher education institution an innovative set of unique professional competences in the hard-skills format.

Keywords: Terminalistics, logistics of terminals and transportation hubs, new academic discipline, transport industry-specific education.

References

- 1. Pokrovskaya O. D. *Terminalistika: obshchie vo*prosy [Terminalistics: general issues]. Monograph. Kazan', Buk Publ., 2016, 142 p. (In Russian)
- 2. Pokrovskaya O. D. & Fedorenko R. V. *Terminalistika: obshchie voprosy* [*Terminalistics: general issues*]. Monograph. Kazan', Buk Publ., 2020, 168 p. (In Russian)
- 3. Pokrovskaya O.D. & Fedorenko R.V. Logistiches-koe rukovodstvo: matematicheskie osnovy terminalistiki, markirovka, klassifikatsiia i identifikatsiia logisticheskikh ob'ektov zheleznodorozhnogo transporta [Logistical management: mathematical foundations of terminalistics, labelling, classification and identification of railway infrastructure logistical objects]. 2nd revised and extended ed. Kazan', Buk Publ., 2020, 290 p. (In Russian)
- 4. Pokrovskaya O. D. Logisticheskoe rukovodstvo: matematicheskie osnovy terminalistiki, markirovka, klassifikatsiia i identifikatsiia logisticheskikh ob'ektov zheleznodorozhnogo transporta [Logistical management: mathematical foundations of terminalistics, labelling, classification and identification of railway infrastructure logistical objects]. Kazan', Buk Publ., 2017, 281 p. (In Russian)
- 5. Ekonomika Rossii: proshloe, nastoiashchee, budushchee [Russia's economy: past, present, future]. Collec-

- tive monograph under the general editorship of N.A. Adamov. Moscow, Institut issledovaniia tovarodvizheniia i kon'iunktury optovogo rynka [Research Institute of the Movement of Goods and Wholesale Markets Conjuncture] Publ., 2014, 248 p. (In Russian)
- 6. Titova T. S., Longobardi A., Akhtyamov R. G. & Nasyrova E. S. Lifetime of earth dams. *Inzhenerno-stroitel'nyi zhurnal* [*Engineering and Construction Journal*], 2017, no. 1 (69), pp. 34–43.
- 7. Efremov V.A. & Kurenkov P.V. Logistizatsiia upravleniia dvizheniem poezdov [Logistisation of train movement management]. *Logistika segodnia* [*Logistics today*], 2004, no. 5, pp. 31–38. (In Russian)
- 8. Kurenkov P. V., Preobrazhenskii D. A., Astaf'ev A. V., Kakhrimanova D. G. & Volkova S. A. Sinkhromodal'nye perevozki i trimodal'nye terminaly kak perspektivnye napravleniia razvitiia logisticheskikh tekhnologii [Synchromodal transportation and trimodal terminals as promising directions for development of logistical technologies]. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie* [*Transport: science, engineering, management*], 2018, no. 11, pp. 13–17. (In Russian)
- 9. Kurenkov P. V., Preobrazhenskii D. A., Astaf'ev A. V., Safronova A. A. & Kakhrimanova D. G. Perspektivnye napravleniia razvitiia politransportnoi logistiki [Promising directions of development of polytransport

- logistics]. *Zheleznodorozhnyi transport* [*Railway transport*], 2019, no. 3, pp. 36–41. (In Russian)
- 10. Polianskii Iu.A. & Kurenkov P.V. Dorozhnyi tsentr situatsionnogo upravleniia: problemy sozdaniia i funktsionirovaniia [Road situation room centre: problems in creating and functioning]. *Ekonomika zheleznykh dorog* [*Economy of the railways*], 2003, no. 1, pp. 51–65. (In Russian)
- 11. Polianskii Iu. A. & Kurenkov P. V. Topologicheskoe modelirovanie vzaimodeistviia khoziaistv zheleznoi dorogi [Topological modelling of railway facilities' interaction]. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie* [*Transport: science, engineering, management*], 2003, no. 7, pp. 8–18. (In Russian)
- 12. Bubnova G. V., Zenkin A. A. & Kurenkov P. V. Transportnye koridory i osi v evraziiskikh kommunikatsiiakh [Transport corridors and lines in Eurasian communications]. *Logistika evraziiskii most [Eurasian bridge of logistics*]. *Proc. of the 12th Intern. sci. Conference*. Krasnoyarsk, KrasGAU [Krasnoyarsk State Agrarian University] Publ., 2017, pp. 25–33. (In Russian)
- 13. Bykadorov S. A., Kurenkov P. V., Serkova A. V. & Chirkova O. V. Analiz metodov opredeleniia sebestoimosti gruzovykh perevozok [Analysis of methods for methods for determination of production costs of cargo transportation]. *Vestnik transporta* [*Transport herald*], 2014, no. 3, pp. 30–41. (In Russian)
- 14. Shcherbakov V. V. *Logistika i upravlenie tsepia-mi postavok* [*Logistics and supply chain management*]. Textbook for academic bachelor's programme. Moscow, Iurait Publ., 2015, 582 p. (In Russian)
- 15. Pokrovskaya O. D. Evoliutsionno-funktsional'nyi podkhod k razvitiiu transportnykh uzlov [Evolutionary and functional approach to development of transportation hubs]. *Politransportnye sistemy* [*Polytransport systems*]. Proc. of the 9th Intern. sci.-eng. Conference. Novosibirsk, SGUPS [Siberian Transport University] Publ., 2017, pp. 233–238. (In Russian)
- 16. Samuilov V. M., Pokrovskaya O. D. & Tsun Ts. Kontseptsiia "Novyi shelkovyi put" (Kitai, Rossiia, Germaniia) ['New Silk Road' conception (China, Russia, Germany)]. *Innovatsionnyi transport* [*Innovative transport*], 2017, no. 4 (26), pp. 26–28. (In Russian)
- 17. Malikov O.B. & Pokrovskaya O.D. Analiz sistemy normirovaniia na zheleznodorozhnom transporte s pozitsii klientoorientirovannosti [Analysis of rate set-

- ting system in the railway transport from the position of client-oriented approach]. *Izvestiia Petersburgskogo universiteta putei soobshcheniia* [*Proceedings of Petersburg Transport University*]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2017, vol. 14, iss. 2, pp. 187–199. (In Russian)
- 18. Pokrovskaya O. D. Kompleksnaia otsenka transportno-skladskikh sistem zhelznodorozhnogo transporta [Integrated assessment of transport and warehousing systems of railway transport]. Dr. Sci. Eng. dissertation. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2018, 377 p. (In Russian)
- 19. Pokrovskaya O. D. & Malikov O. B. Evoliutsion-no-funktsional'nyi podkhod k klassifikatsii transportnykh uzlov [Evolutionary and functional approach to classification of transportation hubs]. *Izvestiia Petersburgskogo universiteta putei soobshcheniia* [*Proceedings of Petersburg Transport University*]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University], 2017, vol. 14, iss. 3, pp. 406–419. (In Russian)
- 20. Pokrovskaya O. & Fedorenko R. Evolutionary-functional approach to transport hubs classification. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2019, no. 982, pp. 356–365.
- 21. Pokrovskaya O. Terminalistics as the methodology of integrated assessment of transportation and warehousing systems. *Web of Conferences 10*. 10th International Scientific and Technical Conference "Polytransport Systems", PTS 2018, 2019, pp. 2–14.
- 22. Pokrovskaya O. & Fedorenko R. Assessment of transport and storage systems. *VIII International Scientific Siberian Transport Forum. TransSiberia 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing.* Z. Popovic, A. Manakov, V. Breskich (eds). Cham, Springer Publ., 2019, vol. 1115, pp. 570–577.
- 23. Pokrovskaya O. & Fedorenko R. Methods of rating assessment for terminal and logistics complexes. VIII International Scientific Siberian Transport Forum. TransSiberia 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing. Z. Popovic, A. Manakov, V. Breskich (eds). Cham, Springer Publ., 2019, vol. 1116, pp. 950–959.
- 24. Pokrovskaya O. D. & Titova T. S. Mezhdistsiplinarnoe polozhenie teorii terminalistiki [Inter-disciplinary position of the terminalistics theory]. *Izvestiia Petersburgskogo universiteta putei soobshcheniia* [*Proceedings of Petersburg Transport University*]. Saint Pe-

tersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University], 2018, vol. 15, iss. 2, pp. 248–260. (In Russian)

- 25. Pokrovskaya O. D. & Koroviakovskii E. K. Logistika terminalov: perspektivnoe napravlenie logistiki [Logistics of terminals: promising logistics direction]. *Izvestiia Petersburgskogo universiteta putei soobshcheniia* [*Proceedings of Petersburg Transport University*]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University], 2015, iss. 3 (44), pp. 155–164. (In Russian)
- 26. Pokrovskaya O. D. & Koroviakovskii E. K. Terminalistika organizatsiia i upravlenie v transportnykh uzlakh [Terminalistics: organisation and management in transportation hubs]. *Izvestiia Petersburgskogo universiteta putei soobshcheniia* [*Proceedings of Petersburg Transport University*]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University], 2016, iss. 4 (49), pp. 509–520. (In Russian)
- 27. Pokrovskaya O. D. & Malikov O. B. Voprosy logisticheskoi ierarkhii zheleznodorozhnykh ob'ektov [Problems of logistical hierarchy of railway objects]. *Izvestiia Petersburgskogo universiteta putei soobshcheniia* [*Proceedings of Petersburg Transport University*]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University], 2016, iss. 4 (49), pp. 521–531. (In Russian)
- 28. Pokrovskaya O. D. & Titova T. S. Organizatsiia transportno-skladskikh sistem [Organisation of transportation and warehousing systems]. *Izvestiia Petersburg-skogo universiteta putei soobshcheniia* [*Proceedings of Petersburg Transport University*]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University], 2018, vol. 15, iss. 3, pp. 327–343. (In Russian)
- 29. Pokrovskaya O. D. & Titova T. S. Instrumentarii logisticheskogo normirovaniia dlia provedeniia audita transportno-skladskikh sistem [Instruments of logistical rate setting for auditing transportation and warehousing systems]. *Izvestiia Petersburgskogo universiteta putei soobshcheniia* [*Proceedings of Petersburg Transport University*]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University], 2019, vol. 16, iss. 2, pp. 175–190. (In Russian)
- 30. Pokrovskaya O. D. Klassifikatsiia uzlov i stantsii kak komponentov transportnoi logistiki [Classification of junctions and stations as elements of transport logistics]. *Vestnik transporta Povolzh'ia* [*Volga region transport herald*], 2016, no. 5 (59), pp. 77–86. (In Russian)

- 31. Pokrovskaya O. D. Klassifikatsiia ob'ektov zheleznodorozhnoi terminal'no-skladskoi infrastruktury [Classification of objects of railway terminal and warehousing infrastructure]. *Vestnik Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniia* [*Ural State University of Railway Transport Herald*], 2017, no. 1 (33), pp. 70–83. (In Russian)
- 32. Pokrovskaya O. D. & Malikov O. B. Klassifikatsiia, ierarkhiia i identifikatsiia ob'ektov terminal'no-skladskoi infrastruktury [Classification, hierarchy and identification of terminal and warehousing infrastructure objects]. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie* [*Transport: science, engineering, management*], 2017, no. 8, pp. 13–22. (In Russian)
- 33. Pokrovskaya O. D. Issledovanie evoliutsii transportnykh uzlov kak logisticheskikh ob'ektov [Study of evolution of transportation hubs as logistical objects]. *Izvestiia Transsiba* [*Trans-Siberian Railway Proc.*], 2017, no. 2 (30), pp. 115–123. (In Russian)
- 34. Pokrovskaya O. D. & Malikov O. B. Metodika postroeniia setevogo grafa struktury logisticheskogo ob'ekta [Method for construction of a network graph for a logistical object structure]. *Mir transporta* [*Transport world*], 2017, no. 3, pp. 79–82. (In Russian)
- 35. Pokrovskaya O. D. Funktsional'no-logisticheskii podkhod k klassifikatsii transportnykh uzlov [Functional and logistical approach to classification of transportation hubs]. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie* [*Transport: science, engineering, management*], 2018, no. 4, pp. 25–31. (In Russian)
- 36. Pokrovskaya O. D. O terminologii ob'ektov terminal'no-skladskoi infrastruktury [On terminology for objects of terminal and warehousing infrastructure]. *Mir transporta* [*Transport world*], 2018, vol. 16, no. 1 (74), pp. 152–163. (In Russian)
- 37. Pokrovskaya O. D. Poniatiinyi apparat teorii terminalistiki [Conceptual framework of terminalistics theory]. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie* [*Transport: science, engineering, management*], 2018, no. 6, pp. 31–37. (In Russian)
- 38. Pokrovskaya O. D. Logisticheskaia klassnost' zheleznodorozhnykh stantsii [Logistical ratings of railway stations]. *Vestnik Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniia* [*Ural State University of Railway Transport Herald*], 2018, no. 2 (38), pp. 68–76. (In Russian)

- 39. Pokrovskaya O. D. Metodika i osobennosti identifikatsii logisticheskikh ob'ektov zheleznodorozhnogo transporta [Methods and specific features of identification of logistical objects of railway transport]. *Vestnik Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniia* [*Ural State University of Railway Transport Herald*], 2018, no. 3 (39), pp. 56–67. (In Russian)
- 40. Pokrovskaya O. D. Indentifikatsiia ob'ektov terminal'no-skladskoi infrastruktury zheleznodorozhnogo transporta [Identification of objects of terminal and warehousing infrastructure of railway transport]. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie* [*Transport: science, engineering, management*], 2018, no. 10, pp. 19–25. (In Russian)
- 41. Pokrovskaya O. D. Klientoorientirovannost' i tsifrovizatsiia terminal'no-logisticheskoi deiatel'nosti [Client-oriented approach and digitalisation of terminal and logistics activities]. *Zheleznodorozhnyi transport* [*Railway transport*], 2019, no. 5, pp. 9–16. (In Russian)
- 42. Pokrovskaya O. D. Kompleksnaia otsenka transportno-skladskikh sistem [Integrated assessment of transport and warehousing systems]. *Zheleznodorozhnyi transport* [*Railway transport*], 2019, no. 7, pp. 26–32. (In Russian)
- 43. Pokrovskaya O. D. Kharakteristika terminalistiki kak logistiki terminalov [Features of terminalistics as logistics of terminals]. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie* [*Transport: science, engineering, management*], 2019, no. 4, pp. 34–41. (In Russian)
- 44. Amrani A. E. *The impact of international logistics parks on global supply chains*. Cambridge MA, Massachusetts Institute of Technology Publ., 2007, 62 p.
- 45. Boile M., Theofanis S. & Strauss-Wieder A. *Feasibility of Freight Villages in the NYMTC Region*. New York, State University of New Jersey Publ., 2011, 119 p.
- 46. Cassone G. C. Models of intermodal node representation. *European Transport*, 2010, no. 46, pp. 72–85.
- 47. Erkayman B., Gundogar E., Akkaya G. & Ipek M. A fuzzy topsis approach for logistics center location selection. *Journal of Business Case Studies* (Turkey), 2011, no. 3, pp. 49–55.
- 48. Apattsev V. I., Efimenko Iu. I., Pravdin N. V. et al. *Zheleznodorozhnye stantsii i uzly* [*Railway stations and hubs*]. Course book. Ed. by V. I. Apattsev and Iu. I. Efimenko. Moscow, Uchebno-metodicheskii tsentr po obrazovaniiu na zheleznodorozhnom transporte [Training and

- Methodology Centre for Railway Transport] Publ., 2014, 855 p. (In Russian)
- 49. Bowersox D. & Closs D. Logistika: integrirovannaia tsep' postavok [Logistical management: The Integrated Supply Chain Process]. Moscow, Olimp-Biznes Publ., 2006, 640 p. (In Russian)
- 50. Vasil'ev S. N. Strategicheskie napravleniia dolgosrochnogo razvitiia transportnoi infrastruktury Sibiri i Dal'nego Vostoka [Strategic directions in long-term development of transport infrastructure of Siberia and the Far East]. Collective monograph. Under academic editorship of S. N. Vasil'ev, S. S. Goncharenko, V. A. Persianov et al. Irkutsk, IrGUPS [Irkutsk State Transport University] Publ., 2009, 524 p. (In Russian)
- 51. Vel'mozhin A. V., Gudkov V. A. & Mirotin L. B. *Teoriia transportnykh protsessov i sistem [Theory of transport processes and systems*]. Moscow, Transport Publ., 2000, 167 p. (In Russian)
- 52. Ventsel' E. S. *Issledovanie operatsii. Zadachi,* printsipy, metodologiia [Operational research. Tasks, principles, methodology]. Moscow, Drofa Publ., 2004, 208 p. (In Russian)
- 53. Volgin V. V. *Sklad: organizatsiia, upravlenie, logistika* [*Warehouse: organisation, management, logistics*]. Moscow, Dashkov i Ko. Press, 2004, 736 p. (In Russian)
- 54. Glukhov V.V., Mednikov M.D. & Korobko S.B. *Matematicheskie metody i modeli dlia menedzhmenta* [*Mathematical methods and models for management*]. Saint Petersburg, Lan' Publ., 2000, 480 p. (In Russian)
- 55. Granberg A. G. *Osnovy regional'noi ekonomiki* [Foundations of regional economy]. Moscow, Dashkov i Ko. Press, 2001, 492 p. (In Russian)
- 56. Vakulenko S. P., Kurenkov P. V., Ellarian A. S., Astaf'ev A. V. & Sechkarev A. A. Konkurentsiia mezhdu magistraliami napravleniia "Sever Iug" [Competition between north-south mainlines]. *Konkurentosposobnost'v global'nom mire: ekonomika, nauka, tekhnologii* [Competitiveness in the global world: economy, science, technologies], 2016, no. 9–2 (24), pp. 23–30. (In Russian)
- 57. Vakulenko S. P. & Kurenkov P. V. Intermodal'nye i mul'timodal'nye perevozki v transportnykh koridorakh Evropy i Azii [Inter-modal and multi-modal transportation in transport corridors of Europe and Asia]. *Zheleznodorozhnyi transport* [*Railway transport*], 2016, no. 6, pp. 73–77. (In Russian)

- 58. Malikov O. B. & Zachek M. A. Klassifikatsiia i otsenka kriteriev effektivnosti transportnogo koridora [Classification and efficiency assessment of a transport corridor]. *Izvestiia Petersburgskogo universiteta putei soobshcheniia* [Proceedings of Petersburg Transport University]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University], 2008, iss. 3, pp. 163–177. (In Russian)
- 59. Malikov O. B. Gruzovye terminaly v sisteme organizatsii poezdopotokov [Cargo terminals in the system of organisation of train flows]. *Zheleznodorozhnyi transport* [*Railway transport*], 2011, no. 9, pp. 74–76. (In Russian)
- 60. Malikov O. B. *Delovaia logistika [Business logistics*]. Saint Petersburg, Politekhnika Publ., 2003, 223 p. (In Russian)
- 61. Malikov O.B. Konteinernye terminaly: ustroistvo, oborudovanie, proektirovanie, issledovanie [Container terminals: installation, equipment, design, research]. Saarbrücken, LAMBERT Academic Publishing, 2014, 257 p. (In Russian)
- 62. Malikov O. B. Opredelenie marshruta transportnogo koridora v seti [Definition of a transport corridor route in the network]. *Aktual'nye problemy upravleniia perevozochnym protsessom* [Current problems in transportation process management]. Collected research papers. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2013, pp. 97–105. (In Russian)
- 63. Malikov O. B. *Sklady i gruzovye terminaly* [*Warehouses and cargo terminals*]. Saint Petersburg, Bizines-Press Publ., 2005, 648 p. (In Russian)
- 64. Malikov O. B. Teoriia skladskikh sistem [Theory of warehousing systems]. *Integrirovannaia logistika* [*Integrated logistics*], 2012, no. 6, pp. 36–39. (In Russian)
- 65. Apattsev V.I., Levin S.B., Nikolashin V.M. et al. *Logisticheskie transportno-gruzovye sistemy* [*Logistical transport and cargo systems*]. Course book. Ed. by V.M. Nikolashin. Moscow, Akademiia Publ., 2003, 304 p. (In Russian)
- 66. Malikov O. B. *Perevozki i skladirovanie tovarov v tsepiakh postavok* [*Transportation and storage of goods in supply chains*]. Monograph. Moscow, Uchebno-metodicheskii tsentr po obrazovaniiu na zheleznodorozhnom transporte [Training and Methodology Centre for Railway Transport] Publ., 2014, 536 p. (In Russian)
- 67. Kirichok A. *Proektirovanie transportno-sklad-skikh kompleksov* [Designing transport and warehousing

- systems]. Moscow, LAMBERT Academic Publ., 2014, 344 p. (In Russian)
- 68. Logisticheskoe upravlenie gruzovymi perevozkami i terminal'no-skladskoi deiatel'nost'iu [Logistical management of cargo transportation and terminals and warehousing activities]. Higher education course book. Ed. by S. Iu. Eliseev, V. M. Nikolashin, A. S. Sinitsyna. Moscow, Uchebno-metodicheskii tsentr po obrazovaniiu na zheleznodorozhnom transporte [Training and Methodology Centre for Railway Transport] Publ., 2013, 427 p. (In Russian)
- 69. Nikolashin V. M. et al. *Koordinatsionno-logisticheskie tsentry* [Coordination and logistics centres]. Study guide. Ed. by V. M. Nikolashin, S. Iu. Eliseev. Moscow, Uchebno-metodicheskii tsentr po obrazovaniiu na zheleznodorozhnom transporte [Training and Methodology Centre for Railway Transport] Publ., 2013, 228 p. (In Russian)
- 70. Ekonomika zheleznodorozhnogo transporta [Railway transport economy]. Course book. Ed. by N. P. Tereshina, B. M. Lapidus. Moscow, Uchebno-metodicheskii tsentr po obrazovaniiu na zheleznodorozhnom transporte [Training and Methodology Centre for Railway Transport] Publ., 2011, 676 p. (In Russian)
- 71. Mirotin L. B., Bul'ba A. V. & Demin V. A. Logistika, tekhnologiia, proektirovanie skladov, transportnykh uzlov i terminalov [Logistics, technology, design of warehouses, transportation hubs and terminals]. Rostov-on-Don, Feniks Publ., 2009, 408 p. (In Russian)
- 72. Shubko V. G. *Zheleznodorozhnye stantsii i uzly* [*Railway stations and hubs*]. Ed. by V. G. Shubko, N. V. Pravdin. Moscow, MPS RF [Russian Federation Ministry of Transportation] Publ., 2002, 368 p. (In Russian)
- 73. Pravdin N. V., Vakulenko S. P., Golovnich A. K. et al. *Proektirovanie infrastruktury zheleznodorozhnogo transporta (stantsii, zheleznodorozhnye i transportnye uzly)* [Designing railway transport infrastructure (stations, railway and transportation hubs)]. Ed. by N. V. Pravdin, S. P. Vakulenko. Moscow, Uchebno-metodicheskii tsentr po obrazovaniiu na zheleznodorozhnom transporte [Training and Methodology Centre for Railway Transport] Publ., 2012, 1086 p. (In Russian)
- 74. Nikolashin V.M. *Servis na transporte* [*Service in transport*]. Moscow, Marshrut Publ., 2011, 272 p. (In Russian)

75. Zhuravlev N. P. & Malikov O. B. *Transportno-gruzovye sistemy* [*Transport and cargo systems*]. Railway transport higher education course book. Moscow, Marshrut Publ., 2011, 366 p. (In Russian)

76. Pokrovskaya O.D. *Organizatsiia raboty skladskoi raspredelitel'noi sistemy* [*Organisation of operation of warehouse distribution system*]. Study guide. Novosibirsk, Tsentr razvitiia nauchnogo sotrudnichestva [Centre for Development of Scientific Cooperation] Publ., 2015, 72 p. (In Russian)

77. Pokrovskaya O.D. *Organizatsiia mezhdunarodnoi* dostavki gruza cherez raspredelitsel'nyi tsentr [Organisa-

tion of international cargo delivery through a distribution centre]. Study guide. Novosibirsk, Tsentr razvitiia nauchnogo sotrudnichestva [Centre for Development of Scientific Cooperation] Publ., 2015, 102 p. (In Russian)

Received: March 23, 2020 Accepted: March 30, 2020

Author's information:

Oksana D. POKROVSKAYA – D. Sci. in Engineering, Senior Lecturer; insight1986@inbox.ru

УДК 625.12

Оценка технического состояния волногасящих сооружений инженерной защиты земляного полотна от волнового воздействия

Р.М. Тлявлин

Филиал АО ЦНИИС «Научно-исследовательский центр «Морские берега», Российская Федерация, 354002, Сочи, ул. Яна Фабрициуса, 1

Для цитирования: *Тлявлин Р. М.* Оценка технического состояния волногасящих сооружений инженерной защиты земляного полотна от волнового воздействия // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2020. — Т. 17. — Вып. 2. — С. 198—209. DOI: 10.20295/1815-588X-2020-2-198-209

Анноташия

Цель: Разработка методики оценки технического состояния волногасящих сооружений инженерной защиты земляного полотна, позволяющая обеспечить безопасность эксплуатации земляного полотна в условиях волнового воздействия. Методы: Выполнен анализ требований нормативной документации по вопросу оценки технического состояния элементов пути в условиях волнового воздействия. Проведены экспериментальные исследования на физических моделях в волновых бассейнах и лотке по взаимодействию волн с сооружениями инженерной защиты земляного полотна. Обследованы железнодорожные пути на приморских участках с определением значимых дефектов сооружений инженерной защиты и их элементов (размывы, просадки, трещины, смещение и др.). Обработка и интерпретация экспериментальных данных, полученных на физических моделях в волновых бассейнах и лотке, и результатов натурных обследований сооружений инженерной защиты земляного полотна. Результаты: Приведены основные дефекты волногасящих сооружений инженерной защиты земляного полотна от волнового воздействия или их элементов. Предложено деление сооружений инженерной защиты земляного полотна от волнового воздействия на отдельные элементы. Определены значения коэффициентов весомости групп элементов в составе сооружений. Введены количественные показатели (критерии) технического состояния элементов сооружений инженерной защиты земляного полотна от волнового воздействия по видам дефектов. Практическая значимость: Новая методика оценки технического состояния волногасящих сооружений инженерной защиты позволит повысить безопасность эксплуатации земляного полотна железнодорожного пути в условиях волнового воздействия. Разработан новый ГОСТ Р «Берегозащитные сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния».

Ключевые слова: Земляное полотно, инженерная защита, мониторинг, обследование, физическое моделирование, техническое состояние.

Введение

Обеспечение безопасной эксплуатации железнодорожного пути — очень важная задача. Железнодорожный путь воспринимает большие нагрузки от проходящих поездов, и его работа происходит в условиях агрессивного воздей-

ствия природной среды. При этом техническое состояние всех элементов верхнего и нижнего строений пути должно обеспечивать безопасное движение поездов.

На участках, где железнодорожный путь проходит вдоль морских побережий, как правило, по полке, выработанной в нагорном откосе, вслед-

ствие протекающих неблагоприятных инженерно-геологических процессов и явлений, обеспечение безопасности движения поездов имеет большое значение. Воздействие неблагоприятных инженерно-геологических процессов и явлений здесь наблюдается как с нагорной, так и с морской стороны.

Для обеспечения безопасной эксплуатации железнодорожного пути необходим комплексный подход, включающий: инженерные изыскания, обследование, проектирование, разработку деклараций безопасности гидротехнических сооружений, мониторинг. Однако в настоящее время так и не разработан комплексный подход и не выработаны комплексные решения для обеспечения безопасной эксплуатации приморских участков железных дорог и снижения риска аварий вследствие размыва волнами земляного полотна железной дороги.

При эксплуатации сооружений, предназначенных для защиты железных дорог от волнового воздействия, контролю их состояния должно уделяться особое внимание.

В соответствии со статьей 9 Федерального закона от 21.07.1997 г. № 117-ФЗ «О безопасности гидротехнических сооружений» собственник гидротехнического сооружения или эксплуатирующая организация обязана обеспечивать контроль (мониторинг) за показателями состояния гидротехнического сооружения [1]. При этом нет нормативного документа, регламентирующего, за какими показателями состояния сооружений инженерной защиты земляного полотна от волнового воздействия следует выполнять контроль.

Традиционный подход к обеспечению безопасной эксплуатации земляного полотна железнодорожного пути в части сооружений инженерной защиты такой:

- 1) выявление аварийных участков;
- 2) согласование необходимости проведения противоаварийных работ с определением финансирования;
- 3) выполнение проектно-изыскательских работ с получением положительных заключений Главных экологической и Государственной

экспертиз или без экспертиз в случае признания чрезвычайной ситуации (ЧС) на аварийном участке;

4) строительные работы.

Проблемой этого подхода является то, что обнаруженные на первом этапе аварийные сооружения инженерной защиты могут и не обеспечить сохранность земляного полотна в период, пока выполняются проектно-изыскательские работы и все необходимые согласования. Однако есть вероятность того, что такие сооружения будут разрушены в течение одного шторма, что приведет к остановке движения поездов. Ярким примером периодически возникающих аварийных ситуаций в результате размыва берегового уступа является участок Сахалинской железной дороги Чехов—Холмск.

Данный подход обусловлен тем, что в настоящее время не существует методики категорирования по степени опасности сооружений инженерной защиты (предназначенных для защиты от волнового воздействия), что, в свою очередь, препятствует разработке программ противодеформационных мероприятий на аварийных и потенциально опасных участках. Как следствие, часто проектирование и строительство сооружений инженерной защиты ведутся в экстренном порядке на уже разрушающихся приморских участках железных дорог. Своевременное выявление опасных приморских участков разных категорий позволило бы заблаговременно обеспечивать безопасную эксплуатацию железных дорог.

Вопрос обследования и мониторинга технического состояния сооружений инженерной защиты земляного полотна от волнового воздействия в нормативной документации не освещен. Например, наиболее подходящий документ ГОСТ Р 54523–2011 [2] распространяется только на те берегозащитные сооружения, которые расположены на акваториях портов. Поэтому необходимость в разработке методики оценки технического состояния волногасящих сооружений инженерной защиты земляного полотна в условиях волнового воздействия является неоспоримой.

Экспериментальные исследования

В волновых лотке и бассейнах Филиала АО ЦНИИС «Научно-исследовательский центр (НИЦ) «Морские берега» в рамках НИОКР «Исследования устойчивости элементов крепления откосных волногасящих сооружений» [3] были выполнены экспериментальные исследования по устойчивости волногасящих набросок, по влиянию их ширины, отметок и крупности отдельных элементов на волногашение в целом.

Исследование устойчивости элементов крепления откосных волногасящих сооружений при фронтальном подходе волн проводились в волновом лотке, длина которого 20 м при ширине 0,6 м и высоте стенок 1,0 м. Волны генерировались щитовым волнопродуктором, установленным в приямке у одной из торцевых стенок. Для чистоты экспериментов исходный волновой режим в лотке подбирался без сооружений. С целью исключения отражения волн в торцевой части лотка отсыпалась волногасящая берма. Вид модели во время одного из экспериментов представлен на рис. 1.

Изучение устойчивости элементов крепления откосных волногасящих сооружений при

подходе волн под различными углами выполнялось в среднем волновом бассейне, ширина которого 13 м, длина — 19 м, а высота стенок — 1 м. Волновой бассейн оснащен установкой, позволяющей щитовому волнопродуктору совершать колебания с заданными частотой и амплитудой; также в бассейне расположен поворотный круг диаметром 12,0 м, предназначенный для оперативного изменения угла подхода волн к модели, находящейся на нем. Исследовались волновая картина у сооружений и устойчивость элементов наброски на откосах сооружений при воздействии волн, подходящих к сооружению под углами в секторе 35—90°.

Цель работы — показать, что в результате интерференции подходящих под углом и отраженных волн в некоторых случаях происходит увеличение волнового воздействия на элементы крепления откосов, в результате чего они теряют свою устойчивость.

На данном этапе были проведены три серии экспериментальных исследований: модель фрагмента вертикальной стенки без волногасящего откоса, с волногасящим откосом с массой элементов крепления откоса, рассчитанной по СП 38.13330.2018 [4], и с волногасящим откосом с



Рис. 1. Вид модели во время эксперимента в волновом лотке

массой элементов крепления откоса, рассчитанной на интерферированную волну. Вид модели во время одного из экспериментов в среднем волновом бассейне представлен на рис. 2.

Экспериментальными исследованиями на предыдущем этапе было установлено, что максимально возможное увеличение волнового воздействия происходит не при фронтальном, а при косом (порядка 30–70°) угле подхода волн к сооружению.

С целью проверки устойчивости элементов наброски волногасящего сооружения был проведен ряд экспериментов в глубоководном волновом бассейне Филиала АО ЦНИИС «НИЦ «Морские берега». Угол подхода волн составлял 32°.

При этом варьировались следующие параметры конструкции:

- уклоны откосов (1:2, 1:3) на разных участках сооружения;
- типы элементов крепления откосов (тетраподы, гексабиты);
 - масса элементов крепления откосов;
- количество и толщина слоев элементов наброски (укладки);
 - ширина полки откосного сооружения.

Глубоководный волновой бассейн в плане имеет форму равнобокой трапеции с основаниями 41 и 25 м и расстоянием между ними 31,5 м. Высота стенок бассейна 1,7 м. Бассейн оснащен волнопродукторами, которые представляют собой группу передвижных однотипных установок, обеспечивающих возвратнопоступательное движение щитов.

Вид модели во время одного из экспериментов в глубоководном волновом бассейне иллюстрирует рис. 3.

По результатам экспериментов получено, что при косом подходе волн к сооружению элементы крепления откоса расчетной массы (по СП 38.13330.2018) неустойчивы. Для обеспечения устойчивости массу элементов крепления откоса следует увеличить в 2 раза и более.

Обследование волногасящих сооружений инженерной защиты земляного полотна

Обследование сооружений инженерной защиты земляного полотна от волнового воздействия выполнялось в рамках работы «Научно-



Рис. 2. Вид модели во время эксперимента в среднем волновом бассейне



Рис. 3. Вид модели во время эксперимента в глубоководном волновом бассейне

исследовательские, обследовательские работы и инженерные изыскания в общем составе работ по комплексному обследованию береговой стороны железнодорожной линии Туапсе—Адлер Северо-Кавказской железной дороги...» [5]. Главной целью выполнения работы являлась разработка первой редакции программы противодеформационных мероприятий.

Основные результаты работы:

- проанализирована архивная техническая документация по инженерно-геологическим условиям участков земляного полотна железнодорожной линии Туапсе—Адлер и прилегающей территории;
- проведен анализ архивной технической документации по защитным и укрепительным сооружениям земляного полотна железнодорожной линии Туапсе—Адлер с оценкой их состояния и деформации, на основе которых дана оценка эффективности и достаточности проведенных ранее противодеформационных мероприятий;
- выполнен сплошной натурный осмотр земляного полотна железно-дорожной линии Туапсе– Адлер и прилегающей территории с описанием

конструкции земляного полотна, состояния всех сооружений земляного полотна, проявлений неблагоприятных инженерно-геологических процессов и явлений на прилегающей территории;

проведено деление железнодорожной линии на однородные типичные группы участков по условиям проявления неблагоприятных инженерно-геологических процессов и явлений на прилегающей территории и степени их опасности и выбраны эталонные объекты для детального обследования.

По результатам выполненной научно-исследовательской работы [5] были сделаны следующие выводы:

- комплекс сооружений инженерной защиты обеспечил стабильность берега и бесперебойное движение поездов в течение многих лет, однако нормативный срок службы большинства сооружений давно истек;
- многие сооружения находятся в неудовлетворительном состоянии и не выполняют в достаточной степени свои волногасящие функции;

- при непроведении реконструкции сооружений инженерной защиты продолжится сокращение волногасящей полосы и, как следствие, разрушение волноотбойных стен. Такая ситуация наблюдалась и наблюдается на отдельных участках. Разрушение волноотбойных стен, в свою очередь, приведет к размыву железнодорожной насыпи;
- динамика искусственного пляжа и бюджет пляжеобразующего материала, особенно за период систематических пополнений, свидетельствуют о низкой эффективности очагового способа отсыпки пляжеобразующего материала, поскольку при этом имеют место большие (до 70%) безвозвратные потери гравийно-галечного материала. При отсыпке искусственного пляжа сплошной полосой проектных размеров потери пляжевого материала будут значительно меньше и, следовательно, затраты на его создание и эксплуатационные пополнения снижены;
- требуется разработка методики оценки технического состояния сооружений инженерной защиты, позволяющая обеспечить безопасность эксплуатации земляного полотна в условиях волнового воздействия.

Категории технического состояния

Для оценки технического состояния волногасящих сооружений инженерной защиты земляного полотна предлагается принять пять категорий технического состояния и коэффициенты сохранности a в соответствии c [2, 6]:

- нормативное (исправное) с коэффициентом сохранности a = 1,0 (дефектов нет);
- работоспособное с коэффициентом сохранности a = 1,0-0,8 (малозначительные дефекты);
- ограниченно работоспособное с коэффициентом сохранности a = 0.8-0.6 (значительные дефекты);
- неработоспособное с коэффициентом сохранности a=0,6-0,4 (значительные дефекты);

- предельное (аварийное) с коэффициентом сохранности a=0,4-0 (критические дефекты).

Коэффициент сохранности группы однородных элементов определяется по формуле

$$a_i = \frac{\sum_{j=1}^{m} a_j}{m},\tag{1}$$

где a_j — частное значение коэффициента сохранности элемента; j=1,2,3,...,m — номер элемента i-й группы однородных элементов; m — количество элементов в i-й группе однородных элементов.

Коэффициент сохранности сооружения из n групп однородных элементов рассчитывается следующим образом:

$$a_n = \frac{\sum_{i=1}^n a_i \cdot b_i}{\sum_{i=1}^n b_i}.$$
 (2)

В (2) i=1,2,3,...,n – порядковый номер элемента конструктивной схемы (группы однородных элементов), b – коэффициент весомости групп элементов в составе сооружения, a_i – коэффициент сохранности группы однородных элементов, который находится по формуле (1).

Таким образом, в результате проведенных исследований для определения коэффициентов сохранности сооружения и его элементов и соответственно категории дефектов:

- 1) предложено деление сооружений инженерной защиты земляного полотна от волнового воздействия на отдельные элементы;
- 2) определены значения коэффициентов весомости групп элементов в составе сооружений:
- 3) составлен перечень основных видов дефектов для каждого берегозащитного сооружения или его элементов;
- 4) получены количественные показатели (критерии) технического состояния элементов сооружения по видам дефектов.

Деление волногасящих сооружений инженерной защиты на отдельные элементы по степени их весомости

В качестве волногасящих сооружений для защиты железнодорожного полотна от волнового воздействия применяются [7, 8] защитные прикрытия из камня или фасонных массивов и пляж.

Исходя из опыта обследований [5, 9–11], мониторинга [12, 13] и физического моделирования взаимодействия волн с сооружениями инженерной защиты [3, 14, 15], было выявлено, что состояние отдельного элемента конструкции может повлиять на ее устойчивость и работоспособность в целом. Поэтому деление сооружений на отдельные элементы выполнялось по степени их весомости. Так, защитные волногасящие прикрытия из камня или фасонных массивов предложено делить на три основных элемента, таких как каменная (или из массивов) наброска, дно перед сооружением и сопряжение сооружения с территорией. Коэффициенты весомости каждого элемента в составе сооружения b приняты 70, 15 и 15% соответственно.

Для волногасящего пляжа можно выделить только один элемент — это само тело пляжа и соответственно коэффициент весомости составит 100%.

Количественные показатели (критерии) технического состояния элементов сооружения по видам дефектов

При обследовании пляжей, как естественного, так и искусственного, основное внимание необходимо уделять определению: мощности активного (подвижного) слоя пляжевого материала; ширины надводной части пляжа; профиля пляжа; состава пляжевого материала; подводной границы пляжа. Оценивать: наличие зон размыва или аккумуляции пляжевого материала; интенсивность размыва или аккумуляции пляжа.

У сооружений откосного типа из наброски проверяют: крупность элементов наброски (крупность камня или марку фасонных массивов); соответствие фактического профиля в подводной и надводной частях сооружения проектному; состояние бермы и откосов; состояние дна перед сооружением.

У берм и волногасящих прикрытий производят осмотр грунта за пределами сооружения в целях установления наличия подмыва и выпучивания. Определяют и фиксируют места сползания, разрушений и вымывания отдельных массивов и (или) камней.

В таблице предложены перечень основных видов дефектов для каждого волногасящего

Виды дефектов элементов волногасящих сооружений инженерной защиты земляного полотна и показатели их технического состояния

№	Наименова-		Показатели состояния элементов		
	ние сооружения или его элемента	Вид дефекта	Работоспособное $(a = 1,0-0,8)$	Предельное/аварийное $(a = 0,2-0)$	
1	Дно перед сооружением	Переуглубление дна в результате размыва	Локальное переуглубление не более чем на $0,2$ м на участке не более $0,25L$, где L — длина элемента сооружения/секции	Локальное переуглубление более чем на 0.5 м на участке более $0.25L$, где L — длина секции/элемента сооружения	
2	Каменная (или из фа- сонных бло- ков) наброска	Размывы и оползни с морской стороны	Не допускаются	Определяются в зави- симости от величины размывов	

Окончание таблицы

	Наименова-		Показатели состояния элементов		
No	ние сооружения или его элемента	Вид дефекта	Работоспособное (a = 1,0-0,8)	Предельное/аварийное $(a = 0,2-0)$	
2	Каменная (или из фа- сонных бло- ков) наброска	Отклонение массы элементов наброски от проектной в сторону уменьшения	До 5%	Более 10%	
2		Отклонение прочности камней (массивов) в сторону уменьшения от проектной	До 7%	Более 20%	
3	Сопряжение сооружения с территорией	Смещение набросных элементов, зазоры, сквозные отверстия и т. п.	При сохранении грунтонепроницаемости	При просыпании или вымывании грунта за- сыпки и просадке территории	
4	Пляж	Отклонение от проектных размеров: – по высоте – по ширине Отклонение крупности частиц пляжеобразующего материала от проектной в сторону уменьшения	До 40 % До 40 % До 10 %	Более 50 % Более 50 % Более 30 %	
		Отклонение прочно- сти частиц материала в сторону уменьшения от проектной	До 5%	Более 10%	

 Π р и м е ч а н и е. Π ляж — это свободно деформируемое сооружение, и определяющим показателем его работоспособности является объем материала. Поэтому уменьшение ширины пляжа при увеличении его отметок (и наоборот) при сохранении общего объема ($\pm 15\,\%$) к дефектам не относится.

сооружения инженерной защиты или его элементов, показатели (критерии) технического состояния элементов сооружений инженерной защиты по каждому виду дефектов.

Заключение

Разработанная методика оценки технического состояния сооружений инженерной защиты позволит повысить безопасность эксплуатации

земляного полотна железнодорожного пути в условиях волнового воздействия. Предложенные в статье положения включены в разработанный в НИЦ «Морские берега» ГОСТ Р «Берегозащитные сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния».

Библиографический список

1. Федеральный закон «О безопасности гидротехнических сооружений» от 21.07.1997 г. № 117-Ф3. –

- URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW 15265 (дата обращения: 13.01.2020 г.).
- 2. ГОСТ Р 54523–2011. Портовые гидротехнические сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния. Утв. Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии № 600-ст от 25.11.2011 г. М.: Стандартинформ, 2012. 106 с.
- 3. Исследования устойчивости элементов крепления откосных волногасящих сооружений: отчет о НИОКР / отв. исп. Г.В. Тлявлина. Сочи: Научисслед. центр «Морские берега», 2016.—131 с.
- 4. СП 38.13330.2018. СНиП 2.06.04—82. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов). Утв. Приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации № 531/пр от 16.08.2018 г. М.: Стандартинформ, 2019. 106 с.
- 5. Научно-исследовательские, обследовательские работы и инженерные изыскания в общем составе работ по комплексному обследованию береговой стороны железнодорожной линии Туапсе—Адлер Северо-Кавказской железной дороги. Этап 2. Проведение сплошного обследования со стороны моря берегозащитных и укрепительных сооружений железнодорожного пути, с одновременным обследованием волногасящей полосы: отчет о НИР / отв. исп. Г.В. Тлявлина. Сочи: Науч.-исслед. центр «Морские берега», 2018. 327 с.
- 6. ВСН 53–86(р). Правила оценки физического износа жилых зданий. Утв. Приказом Госгражданстроя № 446 от 24.12.1986 г. М. : ФГУП ЦПП, 2007. 80 с.
- 7. СП 277.1325800.2016. Сооружения морские берегозащитные. Правила проектирования. Утв. Приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации № 963/пр от 16.12.2016 г. М. : Технорма, 2017. 58 с.
- 8. Жданов А. М. Основные положения проектирования берегоукрепительных сооружений на приморских линиях железных дорог / А. М. Жданов. М. : Трансжелдориздат, 1953. Сообщение № 35. 56 с.

- 9. Тлявлин Р. М. Проблемы обследования и мониторинга сооружений инженерной защиты береговой зоны / Р. М. Тлявлин // Материалы XI Междунар. науч.-практич. конференции «Олимпийское наследие и крупномасштабные мероприятия: влияние на экономику, экологию и социокультурную сферу принимающих дестинаций». Сочи: Сочинск. гос. ун-т, 2019. С. 244—248.
- 10. Рыбка В. Г. Натурные исследования на морских побережьях / В. Г. Рыбка, В. А. Петров, Н. А. Ярославцев // ЦНИИС. 1995. Юбил. вып. С. 110—117.
- 11. Гречищев Е. К. Волногасящие бермы из скального грунта на оз. Байкал / Е. К. Гречищев, В. И. Васянович, Г. Г. Зубаренкова, В. М. Куделин, О. Л. Рыбак // ЦНИИС. 1995. Юбил. вып. С. 92—101.
- 12. Тлявлина Г.В. Сравнение показателей различных типов берегозащитных сооружений / Г.В. Тлявлина, Р.М. Тлявлин, И.Ю. Мегрелишвили // Транспортное строительство. 2011. № 5. С. 10—12.
- 13. Тлявлин Р.М. Оценка состояния берегозащитных сооружений железнодорожного полотна на участке Туапсе—Адлер / Р.М. Тлявлин, Г.В. Тлявлина // Транспортное строительство. 2017. № 2. С. 23—26.
- 14. Тлявлин Р. М. Физическое моделирование взаимодействия волнения с проектируемыми берегоукрепительными сооружениями Имеретинской низменности / Р. М. Тлявлин, Г. В. Тлявлина, С. Ю. Дроботько // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2011. N 7 (2). Р. 112—116.
- 15. Мальцев В. П. Результаты экспериментальных исследований волновых нагрузок на буны / В. П. Мальцев // Труды ЦНИИС. Вопросы совершенствования методов берегозащиты. М.: ЦНИИС, 1990. С. 31—41.

Дата поступления: 15.01.2020 г. Решение о публикации: 23.01.2020 г.

Контактная информация:

ТЛЯВЛИН Роман Маратович – канд. техн. наук; mb-ns@yandex.ru

Assessment of the technical condition of wave canceling structures for engineering protection of roadbeds from wave exposure

R. M. Tlyavlin

JSC TsNIIS branch Scientific Research Center "Morskiye berega," 1, Janis Fabriciuss ul., Sochi, 354002, Russian Federation

For citation: Tlyavlin R. M. Assessment of the technical condition of wave canceling structures for engineering protection of roadbeds from wave exposure. *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2020, vol. 17, iss. 2, pp. 198–209. DOI: 10.20295/1815-588X-2020-2-198-209

Summary

Objective: To develop a methodology for assessing the technical condition of wave canceling structures for engineering protection of roadbeds to ensure the safety of the operation of roadbeds with respect to wave exposure. **Methods:** The study has analyzed the requirements of normative documentation on the assessment of the technical condition of elements of the track with respect to wave exposure. Experimental trials have been carried out on physical models in wave tanks and tray to study the interaction of waves with the roadbed engineering protection structures. Railways in coastal sections have been examined with the identification of engineering protection structure significant defects and their elements (erosion, pockets, cracks, displacement, etc.). Experimental trial data that have been obtained in the trials on physical models in wave tanks and tray, as well as the findings of field studies of the roadbed engineering protection structures have been processed and interpreted. Results: The main defects of wave canceling structures or elements thereof for engineering protection of roadbeds from wave exposure have been described. A division into separate elements of wave canceling structures for engineering protection of roadbeds from wave exposure has been proposed. The weight coefficients values of the groups of elements in the structures have been determined. Quantitative indicators (criteria) of the technical condition of wave canceling structure elements for engineering protection of roadbeds from wave exposure by type of defects have been introduced. Practical importance: The new methodology for assessing the technical condition of wave canceling structures for engineering protection will allow for increased safety of the operation of railway roadbeds with respect to wave exposure. New GOST R "Coastal protection facilities. Rules for inspection and monitoring of technical condition", has been developed.

Keywords: Roadbed, engineering protection, monitoring, study, physical modeling, technical condition.

References

- 1. Federal Law of RF N 117-FZ "On Safety of Hydraulic Engineering Structures" dated July 21, 1997. Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_15265 (accessed: January 13, 2020). (In Russian) 2. GOST R 54523–2011. Portovyye gidrotekhnicheskiye sooruzheniya. Pravila obsledovaniya i monitoringa tekhnicheskogo sostoyaniya [Port hydraulic structures.
- Rules of inspection and monitoring of the technical condition]. Approved by Order N 600-st of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology dated November 25, 2011. Moscow, Standartinform Publ., 2012, 106 p. (In Russian)
- 3. Issledovaniya ustoychivosti elementov krepleniya otkosnykh volnogasyashchikh sooruzheniy [Stability studies of fastening elements of sloping wave canceling structures]. R&D Report by G. V. Tlyavlina. Sochi,

Scientific Research Center "Morskiye berega" Publ., 2016, 131 p. (In Russian)

- 4. SP 38.13330.2018. SNiP 2.06.04–82*. Nagruzki i vozdeystviya na gidrotekhnicheskiye sooruzheniya (volnovyye, ledovyye i ot sudov) [Set of rules 38.13330.2018, Construction rules and regulations 2.06.04–82, Loads and impacts on hydraulic structures (from wave, ice and ships)]. Approved by Order N 531/pr of the Ministry of Construction, Housing and Utilities of the Russian Federation dated August 16, 2018. Moscow, Standartinform Publ., 2019, 106 p. (In Russian)
- 5. Nauchno-issledovateľ skiye, obsledovateľ skiye raboty i inzhenernyye izyskaniya v obshchem sostave rabot po kompleksnomu obsledovaniyu beregovoy storony zheleznodorozhnoy linii Tuapse-Adler Severo-Kavkazskoy zheleznoy dorogi. Etap 2. Provedeniye sploshnogo obsledovaniya so storony morya beregozashchitnykh i ukrepitel'nykh sooruzheniy zheleznodorozhnogo puti, s odnovremennym obsledovaniyem volnogasyashchey polosy [Scientific research, diagnostic studies and engineering surveys in the overall scope of the comprehensive survey of the coastal side of the Tuapse–Adler railway line of the North Caucasus Railway. Stage 2. Conducting a continuous survey of the coast protection and strengthening structures of the railway line from the sea, with simultaneous examination of the wave trap]. Research Report by G. V. Tlyavlina. Sochi, Scientific Research Center "Morskiye berega" Publ., 2018, 327 p. (In Russian)
- 6. VSN 53–86 (r). Pravila otsenki fizicheskogo iznosa zhilykh zdaniy [Industry-Specific Regulations 53–86 (r). Rules for assessing physical deterioration of residential buildings]. Approved by Order N 446 of the USSR National Committee for Civil Engineering and Architecture dated December 24, 1986. Moscow, FSUE TsPP [Center for Design Products in Construction] Publ., 2007, 80 p. (In Russian)
- 7. SP 277.1325800.2016. Sooruzheniya morskiye beregozashchitnyye. Pravila proyektirovaniya [Set of rules 277.1325800.2016. Coastal protection constructions. Design rules]. Approved by Order N 963/pr of the Ministry of Construction, Housing and Utilities of the Russian Federation dated December 16, 2016. Moscow, Tekhnorma Publ., 2017, 58 p. (In Russian)
- 8. Zhdanov A. M. Osnovnyye polozheniya proyektirovaniya beregoukrepitel'nykh sooruzheniy na primorskikh

- liniyakh zheleznykh dorog [Basic provisions of the design of coast strengthening structures on seaside railway lines]. Moscow, Transzheldorizdat Publ., 1953, no. 35, 56 p. (In Russian)
- 9. Tlyavlin R. M. Problemy obsledovaniya i monitoringa sooruzheniy inzhenernoy zashchity beregovoy zony [Problems of examination and monitoring of the coastal engineering protection structures]. *Materialy XI Mezhdunar. nauch.-praktich. konferentsii "Olimpiyskoye naslediye i krupnomasshtabnyye meropriyatiya: vliyaniye na ekonomiku, ekologiyu i sotsiokul 'turnuyu sferu prinimayushchikh destinatsiy"* [Proceedings of the XI International Scientific and Practical Conference "Olympic Heritage and Large-Scale Events: Impact on the Economy, Ecology, and Social and Cultural Sphere of Host Destinations"]. Sochi, Sochi State University Publ., 2019, pp. 244–248. (In Russian)
- 10. Rybka V.G., Petrov V.A. & Yaroslavtsev N.A. Naturnyye issledovaniya na morskikh poberezh'yakh [Field studies in the coastal areas]. *TsNIIS* [Research Institute of Transport Construction], 1995, Anniversary iss., pp. 110–117. (In Russian)
- 11. Grechishchev E. K., Vasyanovich V. I., Zubarenkova G. G., Kudelin V. M. & Rybak O. L. Volnogasyashchiye bermy iz skal'nogo grunta na oz. Baikal [Wave-extinguishing berms of rocky soil on Lake Baikal]. *TsNIIS* [Research Institute of Transport Construction], 1995, Anniversary iss., pp. 92–101. (In Russian)
- 12. Tlyavlina G. V., Tlyavlin R. M. & Megrelishvili I. Yu. Sravneniye pokazateley razlichnykh tipov beregozashchitnykh sooruzheniy [Comparison of parameters of various types of coastal protection structures]. *Transportnoye stroitel'stvo* [*Transport Construction*], 2011, no. 5, pp. 10–12. (In Russian)
- 13. Tlyavlin R.M. & Tlyavlina G.V. Otsenka sostoyaniya beregozashchitnykh sooruzheniy zheleznodorozhnogo polotna na uchastke Tuapse–Adler [Assessment of the condition of railway coastal protection structures in the Tuapse–Adler section]. *Transportnoye stroitel'stvo* [*Transport Construction*], 2017, no. 2, pp. 23–26. (In Russian)
- 14. Tlyavlin R. M., Tlyavlina G. & Drobot'ko S. Yu. Fizicheskoye modelirovaniye vzaimodeystviya volneniya s proyektiruyemymi beregoukrepitel'nymi sooruzheniyami Imeretinskoy nizmennosti [Physical modeling of interaction of waves with coastal protection struc-

tures in Imeretinskaya Lowland]. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*, 2011, no. 7 (2), pp. 112–116. (In Russian)

15. Mal'tsev V. P. Rezul'taty eksperimental'nykh issledovaniy volnovykh nagruzok na buny [The results of experimental studies of wave loads on the groins]. *Proceedings of TsNIIS. Voprosy sovershenstvovaniya metodov beregozashchity [Issues of improving shore pro-*

tection methods]. Moscow, TsNIIS [Research Institute of Transport Construction] Publ., 1990, pp. 31–41. (In Russian)

Received: January 15, 2020 Accepted: January 23, 2020

Author's information:

Roman M. TLYAVLIN – PhD in Engineering;

mb-ns@yandex.ru

УДК 666.762.81:621.83.059.1

Перспективные технологии производства тормозных дисков из керамоматричных композитов на основе SiC-матрицы систем торможения высокоскоростного железнодорожного транспорта

А. А. Воробьев ¹, В. И. Кулик ², **А. С. Нилов** ², **М. А. Спирюгова** ³

- ¹ Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9
- ² Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова, Российская Федерация, 198005, Санкт-Петербург, ул. 1-я Красноармейская, 1
- ³ Самарский государственный университет путей сообщения, Российская Федерация, 443066, Самара, ул. Свободы, 2В

Для цитирования: *Воробьев А. А., Кулик В. И., Нилов А. С., Спирюгова М. А.* Перспективные технологии производства тормозных дисков из керамоматричных композитов на основе SiC-матрицы систем торможения высокоскоростного железнодорожного транспорта // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2020. — Т. 17. — Вып. 2. — С. 210—220.

DOI: 10.20295/1815-588X-2020-2-210-220

Аннотация

Цель: Оценка перспектив применения современных технологических методов получения фрикционных волокнисто-армированных керамоматричных композитов с карбидокремниевой матрицей для изготовления тормозных дисков систем торможения высокоскоростного железнодорожного транспорта. **Методы:** Проведен анализ современного состояния технологических методов, обеспечивающих введение матричного материала в волокнистую преформу и ее уплотнение, основанных на различных твердо-, жидко- и газопарофазных процессах. **Результаты:** Рассмотрены основные стадии этих технологий, выделены их достоинства и недостатки. Оценены перспектива и технико-экономическая эффективность их использования для производства тормозных дисков высокоскоростного железнодорожного транспорта. **Практическая значимость:** Показано, что для производства тормозных дисков высоконагруженных систем торможения железнодорожного транспорта из углеволокнистых керамоматричных композитов с карбидокремниевой матрицей наиболее перспективны твердофазные методы и метод силицирования карбонизированного углепластика. По сравнению с другими данные методы обеспечивают наибольшую экономическую эффективность изготовления тормозных дисков и максимально высокую теплопроводность получаемого композита.

Ключевые слова: Тормозная система поезда, композиционный материал, дисковый тормоз, фрикционный материал, керамоматричный композит, метод жидкофазного силицирования, твердофазный метод.

Введение

Основной тенденцией развития железнодорожного подвижного состава является повышение его скоростных характеристик, которые в настоящее время для пассажирских поездов практически достигли 600 км/ч [1, 2]. Это обстоятельство потребовало применения более совершенных фрикционных материалов для создания систем торможения, которые бы обеспечили высокие и стабильные трибологические характеристики, выполнение постоянно возрастающих нормативных требований к параметрам торможения и при этом выдерживали жесткие условия механического и теплового нагружения при эксплуатации. В наибольшей степени этим условиям отвечают узлы трения в виде тормозных дисков из современных фрикционных материалов на основе дисперсно-наполненных и волокнисто-армированных композиционных материалов (КМ) с металлической, углеродной и керамической матрицами [3, 4]. Однако среди таких материалов последнего поколения наибольшие перспективы применения в скоростных железнодорожных подвижных составах имеют волокнисто-армированные КМ с керамической матрицей (керамоматричные композиты – КМК), которые применяются (или готовятся к применению) в системах торможения ряда высокоскоростных поездов – TVG (Франция), Talent (Германия), Pendolino (Италия), AVE (Испания), Shinkansen (Япония) и др. [5, 6].

Среди современных КМК особое место занимают композиты с SiC- матрицей, армированные углеродными волокнами. Благодаря исключительно высокой твердости, теплостойкости и стойкости к абразивному износу карбида кремния C_f/SiC -композиты являются одними из самых перспективных фрикционных материалов для компонентов высоконагруженных систем торможения. Можно отметить следующие преимущества систем торможения (прежде всего тормозных дисков) на основе карбидокремниевых КМК по сравнению с системами на основе традиционных фрикционных материалов (главным образом металлических и металлокерамических):

- относительно малая плотность, приводящая к уменьшению веса систем торможения (примерно на 40–60%);
- высокая стойкость к изнашиванию в различных атмосферных условиях, что позволяет существенно увеличить количество торможений до ремонта;
- способность поглощать при торможении большое количество кинетической энергии путем преобразования ее в тепловую (в перспективе ожидается рост преобразуемой энергии до 100 МДж);
 - высокая стойкость к термическому удару;
- значительная допускаемая температура эксплуатации более 1273 К.

Важнейшая проблема широкого практического применения КМК заключается в разработке экономически эффективной технологии их получения. Как правило, производство изделий из КМК представляет собой сложный и длительный процесс, в основе которого лежат различные методы уплотнения волокнистых каркасов (преформ) матричным материалом. В данной работе проведен анализ современного состояния и тенденций развития базовых технологических методов, наиболее перспективных для производства тормозных дисков высокоскоростного железнодорожного транспорта из фрикционных карбидокремниевых КМК.

Общая схема и классификация методов производства изделий из КМК с SiC-матрицей

Наиболее общая схема производства изделий, в том числе и фрикционного назначения, из волокнисто-армированных КМК включает следующие основные технологические операции.

1. Получение армирующих структур (волокнистые каркасы, преформы) для КМК. Волокнистые каркасы могут быть: с хаотичным расположением волокон (фетры, войлоки); ориентированные в двух направлениях (волокна, уложенные в двух направлениях или ткани) – структуры 2D; с пространственным расположением воло-

кон — ориентация в трех и более направлениях, соответственно структуры 3D, 4D, 5D, 7D и т. д. Преформы получают различными способами, основными из которых являются: выкладка армирующего материала; ткачество сухих нитей (в том числе и многонаправленное); прошивка тканей; намотка и плетение.

- 2. Насыщение (уплотнение) волокнистого каркаса керамической матрицей. Содержание этой наиболее важной операции определяется конкретным типом технологического процесса, используемого для уплотнения каркаса, и будет рассмотрено далее.
- 3. Механическая обработка. Она производится с целью придания заготовке окончательной формы и размеров готовой детали. Обычно стремятся свести объем необходимой механической обработки к минимуму.
- 4. Нанесение защитных и специальных покрытий на поверхность изделия. Эта операция проводится, если необходимо обеспечить работоспособность изделия в экстремальных условиях, например в окислительной среде при высоких температурах.

Вторая операция – уплотнение волокнистого каркаса керамической матрицей – наиболее важная и трудоемкая. Именно на этой стадии во многом формируется комплекс микроструктурных и эксплуатационных характеристик КМК. В принципе существует достаточно много технологических методов, обеспечивающих введение (инфильтрацию) матричного материала в волокнистую преформу и ее уплотнение, основанных на различных твердо-, жидко- и газопарофазных методах [7, 8]. Необходимо отметить, что каждая группа методов базируется на принципиально разнообразных физикохимических процессах и приводит к получению КМК, отличающихся как составом и структурой, так и их свойствами. Желание получить КМК с максимально высокими характеристиками определило широкое распространение комбинированных многостадийных технологий, в которых на разных стадиях используются различные базовые технологические процессы уплотнения пористых сред.

Применительно к KMK с SiC-матрицей можно выделить следующие варианты базовых методов их получения.

- 1. Твердофазные методы. В основе этих методов лежат технологические процессы, используемые в порошковой металлургии: спекание, горячее прессование и т. п. Матричный материал применяется в виде порошка, который тем или иным способом совмещается с волокнистым армирующим наполнителем. Полученный полуфабрикат помещается в формообразующую оснастку (пресс-форму), где под воздействием высоких температуры и давления происходят образование монолитного материала и формование изделия.
- 2. Жидкофазные методы. Здесь можно выделить два варианта их реализации.

Первый вариант — жидкофазные технологии, основанные на процессах высокотемпературного пиролиза кремнийорганических связующих (поликарбосиланов), которыми пропитывают пористый каркас (процессы PIP — Polymer Infiltration and Pyrolysis). В результате последующей термической обработки поликарбосиланы разлагаются с выделением твердого остатка, обогащенного карбидом кремния.

Второй вариант — метод жидкофазного силицирования, основанный на инфильтрации углеродсодержащей заготовки расплавом кремния (процессы LSI — Liquid Silicon Infiltration). В результате химического взаимодействия между расплавом кремния и углеграфитовыми компонентами заготовки образуется конечный продукт — карбидокремниевая матрица.

3. Газофазные методы. Они основаны на уплотнении пористых волокнистых каркасов в процессе фильтрации газообразных химических реагентов (прекурсоров), их термического разложения и газофазного химического осаждения матричного материала на поверхности нагретых армирующих волокон (процесс CVI – Chemical Vapor Infiltration). Для получения КМК с SiC-матрицей методом CVI используются различные углерод- и кремнийсодержащие газообразные прекурсоры, из которых наиболее распространены метилтрихлорсилан (CH₃SiCl₃) и монометилсилан (CH₃SiH₃).

При выборе методов, перспективных для изготовления тормозных дисков из КМК в системах торможения железнодорожного транспорта, необходимо учитывать технико-экономические требования, предъявляемые к такому типу изделий. Выделим два основных требования, характерных именно для высоконагруженных систем торможения железнодорожного транспорта: технологический метод должен обеспечивать максимально возможную экономическую эффективность изготовления тормозных дисков и максимально высокую теплопроводность получаемого КМК. Первое требование связано с тем, что, например, в высокоскоростных пассажирских составах количество используемых тормозных дисков может составлять до 160 штук и более (как правило, 4 штуки на каждую ось тележки), что накладывает ограничение на их стоимость, во многом определяемую затратами на производство. Второе требование обусловлено условиями функционирования тормозных дисков, когда процесс торможения сопровождается чрезвычайно высоким местным нагревом диска (более 1473 К), что требует интенсивного отвода тепла, в том числе и за счет теплопроводности материала.

Анализ перечисленных выше технологических методов производства изделий из КМК показал, что в наибольшей степени данным требованиям удовлетворяют твердофазные методы и жидкофазный метод на основе LSI-процессов.

Действительно, хотя процессы PIP и CVI обеспечивают относительно высокие физикомеханические характеристики КМК, они являются самыми дорогостоящими [9]. Это связано с особенностями реализации данных методов. Так, практические скорости осаждения матрицы из газовой фазы в CVI-процессах таковы, что время технологического цикла при получении качественного КМК может достигать нескольких недель и даже месяцев, что приводит к очень высокой стоимости конечного композита. В методе РІР для получения качественного КМК требуется многократное (до 3—8 раз и более) повторение цикла «пропитка—отверждение—пиролиз», что определяет длительность процесса в две-три

недели и соответственно резко повышает стоимость получаемого КМК, которая достигает величины порядка 600 долл. США за 1 кг веса материала. Именно поэтому методы CVI и PIP используются в основном для изготовления изделий авиационного и ракетно-космического назначения, где требуются максимальные прочностные характеристики, а стоимость является вторичной составляющей. Кроме того, КМК, получаемые данными методами, характеризуются высокой остаточной пористостью, которая может составлять 10–15%, и, следовательно, имеют недостаточно высокую теплопроводность.

Твердофазные методы получения КМК

В группе методов получения КМК твердофазные технологии наименее распространены. Как правило, они являются модификацией порошкового метода получения технической керамики. Порошок матричного компонента тем или иным способом смешивают с волокнистым армирующим наполнителем (как правило, в форме коротких волокон или усов) и добавляют небольшое количество полимерного связующего. Затем смесь прессуют и термообрабатывают. К достоинствам данного метода относятся сравнительно короткий одностадийный технологический цикл и возможность получения высокоплотных КМК с низкой пористостью.

В работе [10] приведены технология и результаты исследования трибологических свойств карбидокремниевого КМК, который получали путем смешивания субмикронного порошка SiC и коротких высокомодульных углеродных волокон с последующим горячим прессованием (Hot-Pressing). Спекание матрицы проходило при 2273 К и давлении 40 МПа в атмосфере Ar. Объемная доля углеродных волокон в хаотичноармированном КМК не превышала 20%.

При применении сухого перемешивания проблемой может явиться получение гомогенной смеси взятых компонентов, особенно при высоких содержаниях армирующего наполнителя. Дополнительные трудности могут возникнуть при использовании вискеров, которые имеют тенденцию к формированию агломератов, что значительно снижает плотность заготовки.

Из-за трудностей создания гомогенного материала при сухом смешивании большое внимание привлекает растворная (шликерная) технология, основанная на шликерной пропитке волокнистых каркасов с последующей термообработкой. Обобщенная схема такого процесса приведена на рис. 1. Необходимо, чтобы компоненты смеси не агрегировали и были однородно распределены по объему жидкой смеси. Качество диспергирования улучшают перемешиванием и сверхзвуковой вибрацией. После этого деталь можно формовать методом литья. Альтернативная технология состоит в нагревании, в результате которого удаляется вода, после чего высушенную смесь подвергают холодной или горячей прессовке. Смешиванием в жидком растворе получают КМК, усиленные вискерами и короткими волокнами.

Для получения изделий из КМК, армированных непрерывными волокнами, твердофазная технология, как правило, реализуется как двухступенчатый процесс, в котором жгуты, ленты или ткани пропитываются шликером (например, путем протягивания через пропиточную ванну), являющимся суспензией частиц матрицы и связующего, а также возможных добавок, облегчающих спекание частиц. Далее осуществляются их сушка и из полуфабрикатов формуются изделия. Окончательное формирование матрицы КМК происходит в ходе стадии горячего прессования, которая характеризуется температурами 1973—2073 К и давлениями до 100—200 МПа.

В литературе описана твердофазная технология получения изделий КМК с SiC-матрицей [11]. Непрерывные армирующие элементы (на основе высокомодульных углеродных волокон) насыщаются суспензией наноразмерного порошка b-SiC (частицы 20—30 нм), содержащей также связующее вещество и спекающие добавки (Al₂O₃, Y₂O₃ и SiO₂). После высушивания



Рис. 1. Общая схема процесса получения изделий из КМК с использованием шликерной технологии

армирующий материал образует волокнистый листовой препрег. Эти листы раскраиваются, укладываются в матрицу пресса и уплотняются в процессе горячего прессования (температура 2023–2073 К и давление 15– 20 МПа). В результате были получены КМК с очень низкой конечной пористостью (приблизительно 3%) и высокой теплопроводностью (20 Вт/мК).

Применение твердофазной технологии требует соблюдения двух условий. Во-первых, волокна должны сохранять свои свойства после воздействия высоких температур и давлений. Во-вторых, должно обеспечиваться эффективное протекание процесса спекания частиц. Главным недостатком метода является то, что в ходе процесса формирования матрицы сохраняется вероятность деградации свойств армирующих волокон и могут возникнуть проблемы при формовании сложнопрофильных изделий, к которым относятся и тормозные диски с внутренними вентиляционными каналами. Проблема может быть решена путем склеивания или пайки двух, предварительно отформованных, профилированных частей тормозного диска. Для соединения здесь могут быть использованы различные специальные высокотемпературные клеевые композиции и припои [12].

Метод жидкофазного силицирования

В основе метода LSI лежит механизм реакционного спекания материала заготовки — процесс силицирования. Заготовками обычно служат пористые полуфабрикаты, в состав которых обязательно входят углеграфитовые компоненты. В случае получения КМК такие полуфабрикаты дополнительно содержат армирующие углеродные или керамические волокна. В процессе жидкофазного силицирования расплав кремния под действием капиллярных сил и внешнего давления фильтруется через пористую заготовку. В результате химического взаимодействия между расплавом и углеграфитовым материалом заготовки образуется конечный продукт — карбид кремния. Данные технологические процессы об-

ладают рядом достоинств по сравнению с другими методами: КМК имеют достаточно высокие прочность и теплопроводность; структура плотная, практически беспористая; для реализации процесса требуется относительно простое технологическое оборудование; процесс относительно недорог и производителен вследствие его небольшой продолжительности.

Применительно к волокнисто-армированным КМК эта жидкофазная технология имеет несколько модификаций, отличающихся прежде всего способом введения в волокнистый каркас углеродного наполнителя. Наиболее часто встречаются две модификации: пропитка армирующего материала суспензией, содержащей углеграфитовый порошок, и пропитка полимерным связующим с последующей карбонизацией связующего и образованием в межволоконном пространстве кокса — углеродной матрицы.

Так как процесс LSI протекает при высокой температуре, а расплав кремния представляет собой очень агрессивную среду, в том числе и по отношению к армирующим волокнам, то обязательным условием для успешной реализации первой модификации процесса LSI является нанесение на армирующие волокна защитных покрытий. Очевидно, что выполнение данного условия приводит к увеличению трудоемкости процесса получения КМК.

Схема второй модификации процесса LSI – с пропиткой связующим и его пиролизом приведена на рис. 2. Она дает представление о данной модификации LSI-процесса, который можно разделить на несколько основных этапов. Изготовление волокнистой преформы начинается с изготовления углепластика с полимерной матрицей с высоким выходом углерода. Как правило, коммерчески доступны фенольные смолы или другие ароматические полимеры, используемые для изготовления полуфабрикатов традиционными технологическими методами для композитов с полимерной матрицей, такими как литьевое прессование, автоклавное формование, горячее прессование или намотка. Затем углепластиковый композит подвергается пиролизу в инертной атмосфере (например, азота)

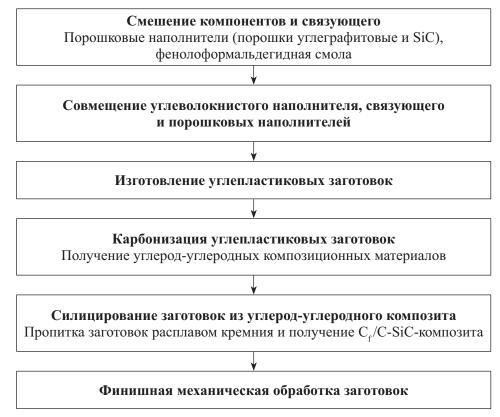


Рис. 2. Схема процесса получения КМК с SiC-матрицей методом силицирования карбонизированного углепластика

или в вакууме при температуре более 1173 К для преобразования полимерной матрицы в аморфный углерод. Пиролиз матрицы углепластика вызывает уменьшение приблизительно на 50% объема исходного полимера с образованием в материале системы открытых пор.

На следующем этапе обработки, за счет капиллярного эффекта, расплавленный кремний (при температуре выше 1700 К) быстро заполняет открытые поры. Экзотермическая реакция между углеродной матрицей и жидким кремнием приводит к образованию SiC. При этом плотная углеродная матрица защищает углеродные волокна внутри пучков волокон от воздействия высокоактивного кремния, а слои SiC образуются на поверхности пор вокруг данных пучков. Таким образом, углеродные волокна, находящиеся внутри пучков, практически не вступают в соприкосновение с кремнием, что исключает необходимость нанесения на них защитных покрытий.

Как правило, полученный по этой модификации процесса LSI композит состоит из следующих компонентов: углеродных волокон, остаточного углерода матрицы, карбида кремния и некоторого количества непрореагировавшего кремния. Так как несущая способность обеспечивается инкапсулированными углеродуглеродными областями, такой материал также называется С // C-SiC-композитом.

Данная модификация технологии LSI рассматривается в настоящее время как наиболее перспективная для получения фрикционных КМК с SiC-матрицей. Углеродные волокна значительно уменьшали здесь хрупкость SiC, делая фрикционные композиты C_f/C -SiC сравнимыми с серыми чугунами.

Фрикционные КМК, получаемые по этой технологии, могут иметь различные структуры, полученные либо послойной укладкой ткани или однонаправленных слоев, либо хаотичным армированием из волокон различной длины, на-

пример из смеси волокон средней длиной 3 и 50 мм, или из очень коротких рубленых волокон длиной 0,70 мм [13, 14]. Надо отметить, что применение технологии прессования заготовок, основанной на использовании коротких волокон, позволяет значительно удешевить и упростить производство фрикционных деталей. Кроме того, квазиизотропные композиты с армированием короткими волокнами имеют более высокую теплопроводность в направлении, перпендикулярном поверхности трения, по сравнению с ортотропными структурами на основе тканей и однонаправленных лент. Это приводит к понижению поверхностной температуры тормозных дисков и соответственно к более высокому и стабильному коэффициенту трения и более низкой скорости износа.

В состав связующего, которым пропитывается волокнистый материал, обычно входят различные порошкообразные добавки. Например, в полимерное связующее вводятся порошки нефтяного кокса, карбида кремния, нитрида бора, графита, сульфида марганца и других веществ [11]. Кроме того, в состав связующего может входить и порошок кремния. В этом случае говорят о процессе с частичным или полным внутренним силицированием [14, 15].

Попытки улучшить эксплуатационные свойства элементов торможения из КМК привели к разработке градиентных фрикционных материалов, в которых высокая износостойкость поверхностных слоев сочетается с высокой ударной вязкостью внутренних слоев. Это достигается, например, созданием материалов, в которых относительное содержание карбидокремниевой матрицы увеличивается к поверхности тормозного элемента или в которых поверхность однородного по составу C_f/C -SiC-композита покрывается слоем со значительным содержанием SiC [7, 16].

В целом, данная технология должна рассматриваться как сквозная, обеспечивающая преобразование материала от исходных полуфабрикатов (углеволокнистый армирующий материал, совмещенный с полимерным связующим) через ряд промежуточных состояний до готового КМК.

К недостаткам данных LSI-процессов следует отнести наличие остаточного кремния в составе матрицы, что может ограничивать температуры применения изделий, а также неоднородность распределения карбида кремния в матрице, которая служит причиной возникновения остаточных напряжений. Вместе с тем по сравнению с другими методами эта модификация LSI считается наиболее перспективной и экономически привлекательной для организации серийного производства изделий из КМК.

Заключение

Проведенный анализ современных технологических методов, используемых для получения волокнисто-армированных КМК с карбидокремниевой матрицей, показал, что для производства из этих материалов тормозных дисков высоконагруженных систем торможения железнодорожного транспорта наиболее перспективны твердофазные методы и метод силицирования карбонизированного углепластика. Рассмотрены основные стадии этих технологий, выделены их достоинства и недостатки. Показано, что по сравнению с другими методами получения КМК данные методы обеспечивают наибольшую экономическую эффективность изготовления тормозных дисков и максимально высокую теплопроводность.

Библиографический список

- 1. Chen J. Temperature field and thermal stress analyses of high-speed train brake disc under pad variations / J. Chen, F. Gao // The Open Mechanical Engineering Journal. 2015. Vol. 9. P. 371–378.
- 2. Гапанович В. А. Высокоскоростной железнодорожный подвижной состав: монография / В. А. Гапанович, А. А. Андреев, Д. В. Пегов и др.; под ред. В. А. Гапановича. СПб.: Изд-во ООО «Типография «НП-Принт», 2014. 304 с.
- 3. Киселев И. П. Высокоскоростной железнодорожный транспорт. Общий курс : учеб. пособие : в $2\,\mathrm{T.}/$

- И. П. Киселёв, Л. С. Блажко, М. Я. Брынь и др.; под ред. И. П. Киселёва. М.: Учеб.-метод. центр по образованию на ж.-д. транспорте, 2018. Т. 2. 397 с.
- 4. Воробьев А. А. Применение композиционных материалов в тормозных системах высокоэнергетичных составов железнодорожного транспорта / А. А. Воробьев, Д. А. Жуков, К. Л. Лукьяненко, В. И. Кулик, А. С. Нилов // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2019. Т. 16. Вып. 3. С. 391–400.
- 5. Schlosser W. Moderne Bremssysteme für Schienenfahrzeuge / W. Schlosser, S. Aurich // ZEV + DET Glasers Annalen. 2001. N 8. P. 273–277.
- 6. CMC Technology and Structures. URL: http://www.dlr.de/bt/en/desktopdefault.aspx/tabid-2499/6930 read-10079 (дата обращения: 05.07.2019 г.).
- 7. Hanbook of ceramic composites / ed. by P. Narottam. Boston; Dordrecht; London: Kluver Academic Publishers, 2005. 554 p.
- 8. Garshin A. P. Contemporary technology for preparing fiber-reinforced composite materials with a ceramic refractory matrix (review) / A. P. Garshin, V. I. Kulik, S. A. Matveev, A. S. Nilov // Refractories and Industrial Ceramics. 2017. Vol. 58. N. 2. P. 148–161.
- 9. Garshin A. P. Analysis of the status and prospects for the commercial use of fiber-reinforced silicon-carbide ceramics / A. P. Garshin, V. I. Kulik, A. S. Nilov // Refractories and Industrial Ceramics. 2012. Vol. 53. N 1. P. 62–70.
- 10. Zhou Y. Processing and tribological properties of SiC/carbon short fiber composites / Y. Zhou, H. Hyuga, K. Hirao, Y. Yamauchi // Journal of the Ceramic Society of Japan. 2006. Vol. 114. N 4. P. 323–328.

- 11. Naslain R. Si-matrix composite materials for advanced jet endines / R. Naslain, F. Cristin // MRS Bulletin. 2003. N 9. P. 854–858.
- 12. Zhang K. Joining of C_f/SiC ceramic matrix composites: A review / K. Zhang, L. Zhang, R. He et al. // Advances in materials science and engineering. 2018. Article ID 6176054. 15 p.
- 13. United States Patent 6936341. Fiber-reinforced ceramic material. Assignee: SGL Carbon AG / R. Hüner, M. Bauer, P. Winkelmann. Filed: 3/12/2004. Iss. 8/30/2005.
- 14. Licciulli A. Ceramic composites for automotive friction devices / A. Licciulli, A. Chiechi, D. Diso, A. Maffezzoli // Advances in Science and Technology. 2006. Vol. 45. P. 1394–1398.
- 15. Mentz J. Processing of porous C/SiC via "inner siliconizing" / J. Mentz, M. Müller, H-P. Buchkremer, D. Stöver // Carbon Conference, 14–19 July 2001, Lexington, Kentucky, USA. 2001. 5 p.
- 16. Krenkel W. C/C–SiC composites for hot structures and advanced friction systems / W. Krenkel // Ceram. Eng. Sci. Proc. 2003. Vol. 4. N 24. P. 583–592.

Дата поступления: 04.03.2020 г. Решение о публикации: 11.03.2020 г.

Контактная информация:

ВОРОБЬЕВ Александр Алфеевич — д-р техн. наук, доцент; 79219751198@yandex.ru КУЛИК Виктор Иванович — канд. техн. наук, доцент; victor.i.kulik@gmail.com НИЛОВ Алексей Сергеевич — канд. техн. наук, доцент; alexey. s.nilov@gmail.com СПИРЮГОВА Мария Александровна — доцент

Promising technologies for the production of brake discs from SiC ceramic matrix composites for braking systems of high-speed railway transport

A. A. Vorobyev¹, V. I. Kulik², A. S. Nilov², M. A. Spiryugova³

¹ Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

- ² D. F. Ustinov "VOENMEKh" Baltic State Technical University, 1, 1-ya Krasnoarmeyskaya ul., Saint Petersburg, 190005, Russian Federation
- ³ Samara State Transport University, 2V, Svobody ul., Samara, 443066, Russian Federation

For citation: Vorobyev A. A., Kulik V. I., Nilov A. S., Spiryugova M. A. Promising technologies for the production of brake discs from SiC ceramic matrix composites for braking systems of high-speed railway transport. *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2020, vol. 17, iss. 2, pp. 210–220. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2020-2-210-220

Summary

Objective: To evaluate the prospects of applying current technological approaches for producing friction fiber-reinforced silicon carbide ceramic matrix composites for the manufacture of brake discs for braking systems of high-speed railway transport. **Methods:** The authors have analyzed the current state of various solid-, liquid- and gas-vapor-based technology providing for the introduction of the matrix material into the fibrous preform and its compaction. **Results:** The main stages of these processes have been considered, their advantages and disadvantages are emphasized. The prospects and technical and economic efficiency of their use for the production of brake discs of high-speed railway transport have been estimated. **Practical importance:** It has been shown that solid-phase methods and the method of carbonized carbon-fiber-reinforced plastic siliconizing are the most promising for the production of brake discs from carbon-fiber SiC ceramic matrix composites for heavily loaded braking systems of railway transport. Compared to other methods, these solutions provide the maximum economic efficiency in the manufacture of brake discs and the highest possible thermal conductivity of the resulting composite.

Keywords: Train braking system, composite material, brake disc, friction material, ceramic matrix composite, liquid-phase siliconizing method, solid-phase method.

References

- 1. Chen J. & Gao F. Temperature field and thermal stress analyses of high-speed train brake disc under pad variations. *The Open Mechanical Engineering Journal*, 2015, vol. 9, pp. 371–378.
- 2. Gapanovich V.A., Andreev A.A., Pegov D.V. et al. *Vysokoskorostnoy zheleznodorozhnyy podvizhnoy sostav* [*High-speed railway rolling stock*]. Monograph. Edited by V.A. Gapanovich. Saint Petersburg, OOO Tipografiya "NP-Print" Publishing House, 2014, 304 p. (In Russian)
- 3. Kiselev I. P, Blazhko L. S., Bryn' M. Ya. et al. *Vysokoskorostnoy zheleznodorozhnyy transport*. Obshchiy kurs: ucheb. posobiye. V 2 t. [*High-speed railway transport*. General course: textbook. In 2 vol.]. Edited by I. P. Kiselyova. Moscow, Training and Methodology Centre for Railway Transport Publ., 2018, vol. 2, 397 p. (In Russian)
- 4. Vorobyev A.A., Zhukov D.A., Lukyanenko K.L., Kulik V.I. & Nilov A.S. Primeneniye kompozitsionnykh materialov v tormoznykh sistemakh vysokoenergetichnykh sostavov zheleznodorozhnogo transporta [Applica-

- tion of composite materials in braking systems of highpower railway trains]. *Izvestiia Peterburgskogo universiteta putei soobshenii* [*Proceedings of Petersburg Transport University*]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2019, vol. 16, iss. 3, pp. 391–400. (In Russian)
- 5. Schlosser W. & Aurich S. Moderne Bremssysteme für Schienenfahrzeuge. *ZEV* + *DET Glasers Annalen*, 2001, no. 8, pp. 273–277.
- 6. *CMC Technology and Structures*. Available at: http://www.dlr.de/bt/en/desktopdefault.aspx/ta-bid-2499/6930 read-10079/(accessed: July 05, 2019).
- 7. *Handbook of ceramic composites*. Ed. by P. Narottam. Boston, Dordrecht, London, Kluwer Academic Publishers, 2005, 554 p.
- 8. Garshin A. P., Kulik V. I., Matveev S. A. & Nilov A. S. Contemporary technology for preparing fiber-reinforced composite materials with a ceramic refractory matrix (review). *Refractories and Industrial Ceramics*, 2017, vol. 58, no. 2, pp. 148–161.
- 9. Garshin A.P., Kulik V.I. & Nilov A. S. Analysis of the status and prospects for the commercial use of fiber-

reinforced silicon-carbide ceramics. *Refractories and Industrial Ceramics*, 2012, vol. 53, no. 1, pp. 62–70.

- 10. Zhou Y., Hyuga H., Hirao K. & Yamauchi Y. Processing and tribological properties of SiC/carbon short fiber composites. *Journal of the Ceramic Society of Japan*, 2006, vol. 114, no. 4, pp. 323–328.
- 11. Naslain R. & Cristin F. Si-matrix composite materials for advanced jet engines. *MRS Bulletin*, 2003, no. 9, pp. 854–858.
- 12. Zhang K., Zhang L., He R. et al. Joining of C_f/SiC ceramic matrix composites. A review. *Advances in materials science and engineering*, 2018, Article ID 6176054, 15 p.
- 13. Hüner R., Bauer M. & Winkelmann P. United States Patent 6936341. Fiber-reinforced ceramic material. Assignee: SGL Carbon AG. Filed: 3/12/2004, iss. 8/30/2005.
- 14. Licciulli A., Chiechi A., Diso D. & Maffezzoli A. Ceramic composites for automotive friction devices. *Advances in Science and Technology*, 2006, vol. 45, pp. 1394–1398.

- 15. Mentz J., Müller M., Buchkremer H-P. & Stöver D. Processing of porous C/SiC via "inner siliconizing". *Carbon Conference* 14–19 July 2001. Lexington, Kentucky, USA, 2001, 5 p.
- 16. Krenkel W. C/C–SiC composites for hot structures and advanced friction systems. *Ceram. Eng. Sci. Proc.*, 2003, vol. 4, no. 24, pp. 583–592.

Received: March 4, 2020 Accepted: March 11, 2020

Author's information:

Aleksandr A. VOROBYEV – D. Sci. in Engineering, Associate Professor; 79219751198@yandex.ru
Viktor I. KULIK – PhD in Engineering, Associate Professor; victor. i.kulik@gmail.com
Aleksey S. NILOV – PhD in Engineering, Associate Professor; alexey. s.nilov@gmail.com
Mariya A. SPIRYUGOVA – Associate Professor

УДК 62-272.2

Подходы к оценке напряженно-деформированного состояния пружин рессорного подвешивания грузовых вагонов

А. М. Орлова¹, Е. А. Рудакова², Д. В. Шевченко², А. В. Гусев², Г. С. Шалпегин²

- ¹ ПАО «Научно-производственная корпорация «Объединенная Вагонная Компания», Российская Федерация, 119002, Москва, Арбат, 10
- ² ООО «Всесоюзный научно-исследовательский центр транспортных технологий», Российская Федерация, 199106, Санкт-Петербург, 23-я линия В.О., 2, лит. А

Для цитирования: *Орлова А. М., Рудакова Е. А., Шевченко Д. В., Гусев А. В., Шалпегин Г. С.* Подходы к оценке напряженно-деформированного состояния пружин рессорного подвешивания грузовых вагонов // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2020. – Т. 17. – Вып. 2. – С. 221–232. DOI: 10.20295/1815-588X-2020-2-221-232

Аннотация

Цель: Оценка статической прочности и определение напряженно-деформированного состояния (НДС) пружин рессорного подвешивания тележки грузового вагона, основанные на аналитических подходах и методе конечно-элементного моделирования. Обоснование допускаемых напряжений, обеспечивающих прочность пружины. **Методы:** Применяются аналитические выражения и метод конечных элементов. **Результаты:** Аналитические подходы к расчету статической прочности пружин рекомендуется использовать на предварительном этапе для экспресс-анализа прочности пружин. Конечно-элементное моделирование позволяет учесть особенности закрепления пружины при работе ее в рессорном подвешивании и точнее определить НДС пружины при ее комбинированном нагружении. При наличии результатов испытаний на кручение и положительных результатов статических испытаний на сжатие (отсутствие остаточных деформаций) прочность пружин рекомендуется оценивать при повышенном коэффициенте, равном 1,15, к пределу текучести. **Практическая значимость:** Разработанная конечно-элементная модель пружины с граничными условиями может применяться для оценки НДС пружин рессорного подвешивания различных типов подвижного состава.

Ключевые слова: Пружины рессорного подвешивания, тележка грузового вагона, напряженнодеформированное состояние, допускаемые напряжения, метод конечных элементов, кинематические и силовые граничные условия для пружины.

Введение

Цилиндрические пружины, применяемые в рессорном подвешивании трехэлементных тележек, работают в тяжелых условиях эксплуатации и подвержены пространственному нагружению в вертикальной и горизонтальной плоскостях (комбинированное нагружение), что оказывает влияние на распределение касательных и нормальных напряжений в рабочих и опорных вит-

ках [1], которое, в свою очередь, зависит от габаритов пружин. При этом оценку статической прочности пружин зачастую проводят только под действием вертикальной (сжимающей) нагрузки [2, 3].

Статическая прочность пружин под действием комбинированных нагрузок (вертикальных и горизонтальных) определяется по различным аналитическим выражениям, которые широко используются на предварительном эта-

пе расчетов [4, 5]. Они получены эмпирическим путем и не применимы для широкого спектра пружин, имеющих разные габариты и работающих в разнообразных условиях. Тем не менее, не прибегая к эксперименту, в настоящее время можно с достаточной точностью оценить пространственное напряженно-деформированное состояние (НДС) посредством численного исследования, которое позволяет учесть реальную геометрию пружины, влияние опорных витков, контактное взаимодействие между витками пружины и граничные условия, характерные тому или иному режиму нагружения. Для уточнения методов оценки и подходов к расчету прочности пружин, применительно к трехэлементным тележкам грузовых вагонов, проведен их сравнительный анализ.

В связи с тем, что в технической литературе нет единообразия по установлению допускаемых напряжений для пружинных сталей, представлены рекомендации по их выбору, основанные на результатах исследований и испытаний материала пружин на кручение.

Допускаемые касательные напряжения при расчете пружин рессорного подвешивания

В соответствии с ГОСТ 1452–2011 [6] в эксплуатации пружины должны обеспечивать стабильную работу (отсутствие остаточных деформаций) на протяжении всего срока службы (не менее 16 лет). Анализ технической литературы показал, что в настоящее время существует противоречие между допускаемыми напряжениями и пределом текучести по касательным напряжениям сдвига для пружинной проволоки. Так, в «Нормах для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС...» (далее – Нормы) [7] допускаемые напряжения среза для І расчетного режима, основное требование которого – не допустить появление остаточных деформаций детали, составляют не менее 750 и 1000 МПа для сталей 55С2 и 60С2ХФА соответственно. Значения предела текучести, согласно ГОСТ 14959–2016 [8], и допускаемых напряжений для различных марок стали приведены в табл. 1.

Анализируя данные, приведенные в табл. 1, можно отметить, что допускаемые значения, согласно Нормам, необоснованно превышают предел текучести на 18%.

Тем не менее по результатам исследований [9] допускаемая величина касательных напряжений может быть установлена больше предела текучести. Из практики известно, что при первом сжатии готовой пружины на заводе-изготовителе максимальные касательные напряжения в ее сечениях могут превышать предел текучести, что приводит к локальному упрочнению, которое в дальнейшем во время эксплуатации при возникновении редких пиковых нагрузок (того же уровня) не представляет опасности. Отечественные и зарубежные ученые [5, 10] установили, что в случае возникновения локальных зон текучести в пружинах, локализо-

Марка стали	Предел текучести		Допускаемое напряжение по I режиму, согласно Нормам, [т], МПа, для элементов		
	σ_{T} , M Π a ¹	τ ₋ , ΜΠα ²	тележки	кузова ³	
55C2, 55C2A, 60C2	1175	678	750	764	
60С2ХФА	1470	849	1000	955	

¹ Соответствует растяжению-сжатию.

² Соответствует кручению и определяется по выражению $\tau_{_{\rm T}} = \sigma_{_{\rm T}}/\sqrt{3}$.

³ Определяется по формуле $[\tau] = 0.65 \cdot \sigma_r$.

ванных в малой области, допускается превышение τ на 10%, согласно выражению

$$[\tau] = 1, 1 \cdot \left(\frac{\sigma_{_{\mathrm{T}}}}{\sqrt{3}}\right) = 0,635 \cdot \sigma_{_{\mathrm{T}}} \approx 0,65 \cdot \sigma_{_{\mathrm{T}}}, (1)$$

что нашло отражение в нормативных документах [4, 11].

Следует отметить, что, поскольку механические характеристики материала зависят от способа упрочнения, реальные значения предела текучести могут отличаться от приведенных в ГОСТ 14959–2016 [8]. Так, для пружин тележки 18-9855, при изготовлении которых применялись дополнительные технологические операции по повышению механических свойств, результаты, полученные при проведении испытаний материала пружин на кручение [12] по ГОСТ 3565-80 [13] и статических испытаний пружин на сжатие, согласно п. 6.6 ГОСТ 1452-2011 [6], а также подконтрольной эксплуатации, подтвердили отсутствие остаточной деформации пружин, следов контакта рабочих витков и массовых изломов пружин в эксплуатации и возможность повышения допускаемых касательных напряжений на 15-20% выше предела текучести при кручении, полученного по ГОСТ 3565-80.

Учитывая рекомендации к установлению допускаемого значения напряжений (1) и положительный опыт эксплуатации пружин, следует оценивать прочность пружин при повышенном коэффициенте, равном 1,15, к пределу текучести τ_{τ} , определенному по результатам испытаний на кручение.

Таким образом, для пружин из стали марки 60 С2ХФА, изготовленных по ГОСТ 14959—2016, допускаемые напряжения могут быть приняты в соответствии с одним из условий:

1) $[\tau] = 0.65 \cdot \sigma_{_T} = 0.65 \cdot 1470 = 955 \ M\Pi a - если$ нет результатов испытаний материала пружин на кручение и подтверждения отсутствия остаточной деформации пружин по результатам статических испытаний на сжатие;

2) $[\tau] = 1,15 \cdot \tau_{_{\rm T}} = 1,15 \cdot 863 = 992 \ {\rm M}\Pi {\rm a} - {\rm пр}{\rm u}$ наличии результатов испытаний, где $\sigma_{_{\rm T}}$ – предел

текучести материала пружин при растяжении— сжатии; $\tau_{_{\rm T}}$ — предел текучести по результатам испытаний материала пружин на кручение, $\tau_{_{\rm T}}$ = 863 МПа, согласно [12].

Аналитический подход к определению статической прочности пружин

В нормативных документах [2, 4, 7, 11] нет единого подхода к оценке статической прочности пружин, которая в большинстве случаев, применительно к пружинам центрального рессорного подвешивания, определяется только под действием вертикальной нагрузки. Однако конструкция трехэлементных тележек при движении грузовых вагонов в кривых участках пути допускает поперечное перемещение надрессорной балки, что вызывает соответствующее боковое отклонение опорных витков пружин и оказывает влияние на изменение характера распределения касательных напряжений в сечениях витка.

В соответствии с ГОСТ 33211-2014 [14] несущие элементы тележки рассчитывают при действии вертикальной силы с учетом вертикальной добавки от продольных сил инерции, а также под действием комбинированного нагружения, дополнительно принимая во внимание действие горизонтальных сил. Поскольку пружины рессорного подвешивания участвуют в передаче сил от несущих элементов конструкции тележки (вертикальные и боковые силы, воспринимаемые надрессорной балкой, передаются на рессорное подвешивание), оценку их статической прочности рекомендовано проводить, согласно режимам Іа (вертикальная сила с учетом вертикальной добавки от продольных сил инерции) и Ів (комбинированная нагрузка, дополнительно учитывающая боковую силу) [15]. В связи с тем, что комбинированное нагружение является наиболее критичным случаем, рассмотрим режим $I \, \epsilon$.

В XX в. были проведены исследования учеными разных стран и получены выражения для

определения касательных напряжений в витках пружины при действии на нее комбинированных нагрузок [9, 16, 17], которые в настоящее время рекомендуется учитывать в соответствии с нормативной документацией [4, 7, 18].

Используя сочетания сил, согласно режиму Ів, были установлены силовые и кинематические граничные условия для оценки прочности пружин (рис. 1, вариант 1), входящих в состав центрального рессорного подвешивания трехэлементной тележки, при действии комбинированных нагрузок: вертикальной силы P_{n} с учетом вертикальной добавки от продольных сил инерции $P_{_{\rm B},2}$ и боковой силы $P_{_{\rm G}}$, определяемой из условия замыкания боковых зазоров между боковой рамой и надрессорной балкой, возникающих при торможении состава, двигающегося в кривом участке пути (выжимание вагона в кривой) [15]. Боковая сила на пружину P_{ϵ} была рассчитана с учетом горизонтальной жесткости, определенной методом конечных элементов (далее – МКЭ) [19].

Кинематические граничные условия, согласно варианту 1 расчетной схемы пружины (рис. 1), разрешают перемещения (U) всех точек верхнего опорного тела только вдоль вертикальной (z) и одной из горизонтальных осей (x или y), а также вращение (φ) всей плоскости верхнего опорного тела вокруг другой горизонтальной оси. Кинематические граничные условия, согласно варианту 2, отличаются от варианта 1 запретом поворота плоскости верхнего опорного тела, что соответствует работе пружин буксового подвешивания тележек с жесткой рамой (Y 25, KB3-ЦНИИ и др.).

Как показывают результаты исследований [20], аналитические выражения по расчету напряжений в пружине, приведенные в DIN 13906-1 [4] и Нормах [7] (также представлена в РД.32.51–95 [18]), учитывают граничные условия относительного сдвига их оснований (рис. 1, вариант 2) и для одной и той же пружины дают значительное расхождение результатов (не менее 16%). Кроме того, для малогабаритных пру-

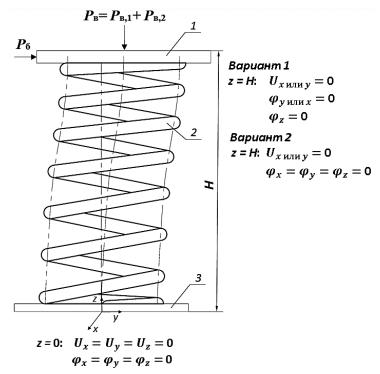


Рис. 1. Расчетная схема пружины для оценки НДС: 1 – верхнее опорное тело; 2 – пружина; 3 – нижнее опорное тело; H – высота пружины в свободном состоянии с учетом толщины нижнего и верхнего опорных тел

жин, средний диаметр которых менее 100 мм, касательные напряжения от горизонтальной нагрузки отрицательные, при этом методика расчета прочности пружин, согласно Нормам, не дает однозначных рекомендаций по учету этой составляющей касательных напряжений в общей формуле НДС: принимать отрицательное значение (в данном случае итоговый результат зачастую получается ниже предела текучести материала при кручении в 1,5–2 раза) или по модулю (здесь напряжения, возникающие в поперечном сечении прутка пружины, могут быть значительно выше (в 2–2,5 раза, чем в первом случае)).

При расчете прочности малогабаритных пружин в соответствии с DIN 13906-1 может наблюдаться значительное превышение предела текучести материала пружин, а в сравнении с МКЭ аналитический расчет приводит к существенному расхождению результатов (до 40%) для различных вариантов исполнения пружин. Однако опыт серийной эксплуатации тележек с таким рессорным подвешиванием показывает отсутствие остаточных деформаций и массовых изломов пружин, что свидетельствует об ограничении применимости формулы из DIN 13906-1 [4].

В связи с этим далее рассмотрим подход конечно-элементного моделирования для определения НДС пружины с применением расчетной схемы, эквивалентной поведению пружины в рессорном подвешивании трехэлементной тележки (рис. 1, вариант 1).

Оценка НДС пружин с помощью МКЭ

Для оценки НДС пружины в программной системе Siemens NX [21] была использована конечно-элементная модель пружины, разработанная ранее для исследований горизонтальной жесткости (рис. 2) [15, 19].

Габаритные размеры опорных тел выбирались таким образом, чтобы толщина каждого из них была не менее диаметра прутка пружины, а

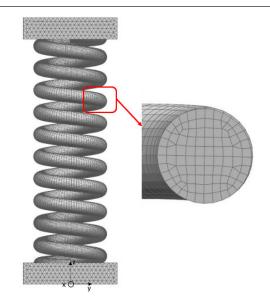


Рис. 2. Конечно-элементная модель пружины

остальные размеры – не менее наружного диаметра пружины.

Между опорными поверхностями витков пружины и опорными телами учитывалась возможность возникновения контактного взаимодействия, для которого были реализованы граничные условия

$$U_{z \text{ виток}} = U_{z \text{ опора}},$$
 (2)

$$\tau_{xy \text{ BUTOK}} - \tau_{xy \text{ OHODA}} \le \mu P,$$
(3)

где $U_{z\, \rm виток}$ и $U_{z\, \rm опора}$ — перемещения на контактных поверхностях опорного тела и опорного витка пружины соответственно; $\tau_{xy\, \rm виток}$, $\tau_{xy\, \rm опора}$ — касательные напряжения на контактных поверхностях опорного тела и опорного витка пружины соответственно; μ — коэффициент трения (принято, что μ = 0,3); P — контактное давление, определяемое МКЭ.

Для описания граничных условий была введена декартова система координат, расположенная в основании нижнего опорного тела, центр которой совпадает с осевой линией пружины. Ось z системы координат совпадает с осью пружины, ось x принадлежит плоскости, образованной основанием нижнего опорного тела, а ось y перпендикулярна осям x и z. При этом пружина

сориентирована таким образом, чтобы окончание ее нижнего опорного витка при проекции на плоскость, образованную осями x и y, совпадало с осью x.

В процессе анализа, согласно расчетной схеме пружины (рис. 1), силовые граничные условия прикладывались к верхнему опорному телу поэтапно:

- 1) на первом этапе прикладывалась только вертикальная сила $P_{_{\rm B,l}}$, соответствующая полной грузоподъемности вагона;
- 2) на втором этапе дополнительно прикладывались вертикальная сила $P_{_{\rm B},2}$, соответствующая вертикальной составляющей сил инерции, и боковая сила $P_{_{\rm G}}$, возникающая при прохождении вагоном кривых участков пути.

В процессе анализа НДС, в том числе и НДС цилиндрических пружин, часто используют критерий максимальных касательных напряжений, предложенный Треска и Сен-Венаном. Недостатком такого подхода является то, что он не учитывает влияние среднего главного напряжения. Для пружин, воспринимающих только вертикальные нагрузки, этот критерий вполне применим, так как реализуется состояние, приближенное к чистому сдвигу, при котором среднее главное напряжение стремится к нулю. В случае же действия на пружину помимо вертикального еще и горизонтального воздействия важно учитывать все компоненты тензора напряжений. Следовательно, использовать такой критерий для оценки НДС пружин тележек грузовых вагонов некорректно.

В случае сложного напряженного состояния нужно использовать критерий прочности Губера—Мизеса, который позволяет учесть влияние всех компонентов тензора напряжений. Данный критерий выражается через интенсивность касательных напряжений следующим образом:

$$\tau_{_{\mathrm{H}}} = \frac{1}{\sqrt{6}} \times \times \sqrt{(\sigma_{1} - \sigma_{2})^{2} + (\sigma_{2} - \sigma_{3})^{2} + (\sigma_{3} - \sigma_{1})^{2}} < (4) \times [\tau],$$

где σ_1 , σ_2 , σ_3 – главные напряжения; $[\tau]$ – допускаемое касательное напряжение.

С целью верификации конечно-элементной модели для пружины второй ступени пассажирского тепловоза было проведено сопоставление результатов аналитического расчета статической прочности и НДС с помощью МКЭ при действии комбинированных нагрузок (кинематические граничные условия соответствуют варианту 2 на рис. 1) с экспериментальными данными, представленными в [1, 18], табл. 2 и на рис. 3.

Расхождение экспериментального значения максимальных касательных напряжений в сравнении с аналитическим расчетом и МКЭ составило в среднем 10,3 и 1,5% соответственно, что дало возможность использовать разработанную конечно-элементную модель для дальнейших исследований.

По результатам конечно-элементного моделирования был проведен расчет НДС пружин тележек 18-100, 18-194-1 и 18-9855 МКЭ для

TA DITTILA A		
ТАБЛИПАЭ	Оценка статической прочности пружины различными мет	опами

Расчетный	Рабочая вертикальная нагрузка на пружину, кН	Горизонтальная нагрузка на пружину, кН	Максимальные касательные напряжения, МПа			
случай			Аналитический расчет [7, 18]	Эксперимент [1, 18]	МКЭ	
1	40	4,95	526	517	519	
2	40	11,90	755	622	632	
3	52.5	4,10	654	638	650	
4	53,5	9,84	890	770	754	

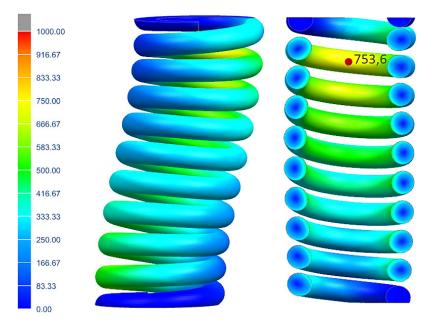


Рис. 3. Распределение интенсивности расчетных касательных напряжений для пружины тепловоза (МПа) [1, 18]

режима Iв с учетом граничных условий (2)–(3) и критерия (4), согласно расчетной схеме (рис. 1, вариант 1), результаты которого приведены в табл. 3 и на рис. 4.

Дополнительно в табл. 3 представлены результаты аналитического расчета прочности пружин при действии вертикальной и боковой сил, согласно Нормам.

Предложенная методика расчета пружин МКЭ на прочность также была апробирована

на пружинах типа D5, применяемых в тележке Motion Control [20]. Результаты расчета показали, что распределение зон с максимальными значениями напряжений зависят от схемы закрепления опорных витков. Так, учет кинематических граничных условий, согласно варианту 1 в сравнении с вариантом 2 (см. рис. 1), способствует увеличению максимальных касательных напряжений в витках пружины в среднем на 6,5%.

ТАБЛИЦА 3. Результаты расчета НДС пружин МКЭ

	Максимальные касательные напряжения, МПа						
Пружина	Тележка 18-100		Тележка 18-194-1		Тележка 18-9855		
	МКЭ	Нормы	МКЭ	Нормы	МКЭ	Нормы	
Наружная	923	897	960	928	924	1080	
Внутренняя	910	957	989	1104	967	571 (1299*)	
Наружная (клин)			-	_	751	925	
Внутренняя (клин)	-		835	883	905	542 (1240*)	

^{*} Расчет напряжений по модулю.

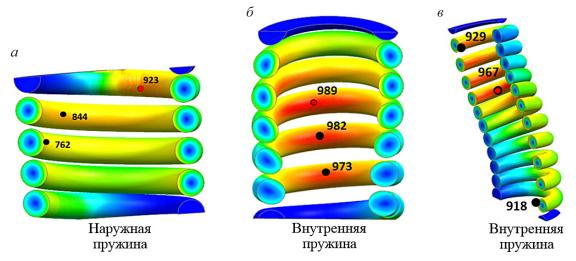


Рис. 4. Распределение интенсивности расчетных касательных напряжений (МПа): a — наружная пружина тележки 18-100; δ — внутренняя пружина тележки 18-194-1; ϵ — внутренняя пружина тележки 18-9855

Анализ результатов аналитических расчетов и конечно-элементного моделирования НДС пружин показал:

– формула из Норм [7] дает более или менее корректный результат только для крупногабаритных пружин, что свойственно тележкам 18-100 и 18-194-1, а также тележке 18-9855 (наружные пружины), для которых расхождение результатов в сравнении с МКЭ не превысило 20%. Для малогабаритных пружин (внутренние пружины тележки 18-9855) расхождение результатов составило в среднем 35%, что подтверждает ограничение применения формулы Норм только классом крупногабаритных пружин (средний диаметр не менее 100 мм);

— максимальные касательные напряжения по результатам конечно-элементного моделирования имеют локальный характер распределения и статическая прочность пружин тележек 18-100, 18-194-1 и 18-9855, изготовленных из стали марки 60С2ХФА, обеспечена по условию непревышения допускаемых касательных напряжений 992 МПа [12].

Заключение

Из приведенных в статье результатов следует, что существует значительное различие по вели-

чине расчетных касательных напряжений, полученных на основе разных аналитических подходов, что, вероятно, связано с заложенными в их основу допущениями.

Учитывая, что аналитические соотношения получены в основном эмпирическим путем и описывают только некий конкретный класс пружин, говорить о распространении той или иной формулы на все пружины в целом не представляется возможным. Вместе с тем МКЭ, базирующийся на общих фундаментальных уравнениях теории упругости, позволяет учесть все особенности геометрии пружин, способ их закрепления и нагружения, особенности взаимодействия между витками, позволяет детально проанализировать НДС всей пружины, определив расположение зон с максимальными напряжениями. В связи с этим для проектирования цилиндрических пружин, работающих под действием комбинированных нагрузок, следует рекомендовать подходы, основанные на применении МКЭ, а использование аналитических выражений проводить на предварительном этапе расчета для экспресс-анализа.

При наличии результатов испытаний по определению механических характеристик материала пружин при кручении по ГОСТ 3565—80 и положительных результатов статических

испытаний пружин на сжатие по п. 6.6 ГОСТ 1452–2011 (отсутствие остаточной деформации) допускается оценивать прочность пружин при повышенном коэффициенте, равном 1,15, к пределу текучести при кручении.

На основе полученных результатов были сформулированы предложения по оценке НДС пружин тележек грузовых вагонов в нормативную документацию [14].

Библиографический список

- 1. Рогожкина А. Е. Прочность железнодорожных пружин / А. Е. Рогожкина, В. И. Романов // Конструирование и технология изготовления пружин: сб. науч. трудов. Устинов: Удмурт. гос. ун-т, 1986. С. 156—170.
- 2. ГОСТ 13765–86. Пружины винтовые цилиндрические сжатия и растяжения из стали круглого сечения. Обозначение параметров, методика определения размеров. М.: Стандартинформ, 1986. 17 с.
- 3. JIS B 2704-1:2009. Coil springs Part 1: Basic calculation methods on helical compression and extension springs. Tokyo, Japanese Standards Association, 2009. 24 p.
- 4. DIN EN 13906-1:2013. Cylindrical helical springs made from round wire and bar. Calculation and design Part 1: Compression springs. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung, 2013. 37 p.
- 5. Wahl A. M. Mechanical springs / A. M. Wahl. Cleveland: Penton Publishing Company, 1944. 463 p.
- 6. ГОСТ 1452–2011. Пружины цилиндрические винтовые тележек и ударно-тяговых приборов подвижного состава железных дорог. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2011. 20 с.
- 7. Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). М.: ГосНИИВ-ВНИИЖТ, 1996. 319 с.
- 8. ГОСТ 14959–2016. Металлопродукция из рессорно-пружинной нелегированной и легированной стали. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2017. 32 с.
- 9. Вершинский С.В. Расчет вагонов на прочность / С.В. Вершинский; под ред. Л.А. Шадура. 2-е изд. М.: Машиностроение, 1980. 432 с.

- 10. Львов Д.В. О методике расчета на прочность пружин при действии комбинированных нагрузок / Д.В. Львов, В.И. Романов // Труды ВНИКТИ. 1976. С. 68–74.
- 11. ГОСТ 34093–2017. Вагоны пассажирские локомотивной тяги. Требования к прочности и динамическим качествам. М.: Стандартинформ, 2017. 42 с.
- 12. Орлова А. М. Определение механических свойств стали пружин рессорного подвешивания тележек грузовых вагонов / А. М. Орлова, Е. А. Рудакова, А. В. Гусев // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения.— СПб.: ПГУПС, 2016.— Вып. 3.— С. 380—386.
- 13. ГОСТ 3565–80. Металлы. Метод испытания на кручение. М.: Изд-во стандартов, 1980. 17 с.
- 14. ГОСТ 33211—2014. Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам. M. : Стандартинформ, 2014. 93 с.
- 15. Орлова А. М. Современная концепция расчета цилиндрических пружин сжатия / А. М. Орлова, Е. А. Рудакова, А. В. Гусев // Материалы XIV Междунар. науч.-техн. конференции «Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты».— СПб.: ПГУПС, 2019.—С. 198—203.
- 16. Biezeno C. Die Knickung von Schraubenfedern / C. Biezeno, I. Koch // Z.A.M.M. 1925. Vol. 5. S. 279–280.
- 17. Sparing W.H. How much force to deflect a spring sideways / W.H. Sparing // Spring Design and Application. 1961. P. 336–337.
- 18. РД 32.51–95. Методика расчета на прочность пружин рессорного подвешивания подвижного состава железных дорог при действии продольных и комбинированных нагрузок. Руководящий документ.— М.: ВНИТИ, 1995.—44 с.
- 19. Орлова А. М. Анализ методик расчета горизонтальной жесткости пружин рессорного подвешивания грузовых вагонов / А. М. Орлова, Е. А. Рудакова, Д. В. Шевченко, А. В. Гусев, С. И. Попович, Р. А. Савушкин // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2019. Т. 16. Вып. 2. С. 191—201.
- 20. Orlova A. M. Coil springs in suspensions of railway vehicles / A. M. Orlova, A. M. Sokolov, E. A. Rudakova, D. V. Shevchenko, A. V. Gusev, S. I. Popovich // 26th International symposium on Dynamics of Vehicles on Roads and Tracks. Programme and Proceedings. Sweden, Gothenburg, 2019. Paper N 032.

21. Гончаров П. С. NX Advanced simulation. Инженерный анализ / П. С. Гончаров, И. А. Артамонов, Т. Ф. Халитов, С. В. Динисихин, Д. Е. Сотник. – М.: ДМК Пресс, 2012. – 504 с.

Дата поступления: 04.03.2020 г. Решение о публикации: 11.03.2020 г.

Контактная информация:

ОРЛОВА Анна Михайловна – д-р техн. наук, зам. генерального директора по стратегии и продукту; aorlova@uniwagon.com

РУДАКОВА Екатерина Александровна – канд. техн. наук, ведущий науч. сотрудник, руководитель отдела комплексных исследований динамики взаимодействия экипажа и пути; erudakova@tt-center.ru

ШЕВЧЕНКО Денис Владимирович – канд. техн. наук, зам. исполнительного директора по науке; dshevchenko@tt-center.ru

ГУСЕВ Артем Владимирович – канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник; agusev@tt-center.ru ШАЛПЕГИН Григорий Сергеевич – мл. инженер-исследователь; gshalpegin@tt-center.ru

Approaches to assessing the stress-strain state of freight car spring suspension coils

A. M. Orlova¹, E. A. Rudakova², D. V. Shevchenko², A. V. Gusev², G. S. Shalpegin²

- PJSC Research and Production Corporation "United Wagon Company," 10, Arbat, Moscow, 119002, Russian Federation
- ² OOO All-Union Research and Development Center for Transport Technology, 2-A, Line 23, Vasilyevksy Island, Saint Petersburg, 199106, Russian Federation

For citation: Orlova A. M., Rudakova E. A., Shevchenko D. V., Gusev A. V., Shalpegin G. S. Approaches to assessing the stress-strain state of freight car spring suspension coils. *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2020, vol. 17, iss. 2, pp. 221–232. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2020-2-221-232

Summary

Objective: To assess static strength and determine the stress-strain state (SSS) of the spring suspension coils of a freight car bogie, based on analytical approaches and the finite element modeling. To substantiate permissible stresses ensuring the strength of the spring. **Methods:** Analytical expressions and the finite element method have been applied. **Results:** Analytical approaches to calculating the static strength of springs are recommended at the preliminary stage for express analysis of the spring strength. Finite-element modeling allows us to take into account the specifics of fixing the spring suspension coil and to determine more accurately the coil SSS under combined loading. If torsion test results are available and positive static compression test results are obtained (absence of residual deformation), we recommend evaluating the spring strength with an increased coefficient of 1,15 of the yield strength. **Practical importance:** The developed finite element model of the coil with boundary conditions can be used to estimate the spring suspension coil SSS of various types of rolling stock.

Keywords: Spring suspension coils, freight car bogie, stress-strain state, permissible stresses, finite element method, kinematic and force boundary conditions for the coil.

References

- 1. Rogozhkina A. E. & Romanov V. I. Prochnost' zheleznodorozhnykh pruzhin [Durability of railway springs]. *Konstruirovaniye i tekhnologiya izgotovleniya pruzhin.* Sb. nauch. trudov [*Design and manufacturing technology of springs.* Scientific proceedings]. Ustinov, Udmurt State University Publ., 1986, pp. 156–170. (In Russian)
- 2. GOST 13765–86. Pruzhiny vintovyye tsilindricheskiye szhatiya i rastyazheniya iz stali kruglogo secheniya. Oboznacheniye parametrov, metodika opredeleniya razmerov [Cylindrical helical compression (tension) springs made of round steel. Designation of parameters, methods for determination of dimensions]. Moscow, Standartinform Publ., 1986, 17 p. (In Russian)
- 3. JIS B 2704-1:2009. Coil springs Part 1: Basic calculation methods on helical compression and extension springs. Tokyo, Japanese Standards Association Publ., 2009, 24 p.
- 4. DIN EN 13906-1:2013. Cylindrical helical springs made from round wire and bar. Calculation and design Part 1: Compression springs. Berlin, DIN Deutsches Institut für Normung Publ., 2013, 37 p.
- 5. Wahl A. M. *Mechanical springs*. Cleveland, Penton Publishing Company, 1944, 463 p.
- 6. GOST 1452–2011. Pruzhiny tsilindricheskiye vintovyye telezhek i udarno-tyagovykh priborov podvizhnogo sostava zheleznykh dorog. Tekhnicheskiye usloviya [Helical springs for trucks and draw-and-buffer gears of railway rolling stock. Specifications]. Moscow, Standartinform Publ., 2011, 20 p. (In Russian)
- 7. Normy dlya rascheta i proyektirovaniya vagonov zheleznykh dorog MPS kolei 1520 (nesamokhodnykh) [Norms for calculation and design of wagons of the railroads of Ministry of Railways of a track of 1520 mm (not self-propelled)]. Moscow, GosNIIV, VNIIZhT Publ., 1996, 319 p. (In Russian)
- 8. GOST 14959–2016. Metalloproduktsiya iz ressorno-pruzhinnoy nelegirovannoy i legirovannoy stali. Tekhnicheskiye usloviya [Spring nonalloy and alloy steel products. Specifications]. Moscow, Standartinform Publ., 2017, 32 p. (In Russian)
- 9. Vershinsky S. V. *Raschet vagonov na prochnost'* [*Calculation of strength of cars*]. Edited by L.A. Shadur. Ed. 2. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1980, 432 p. (In Russian)

- 10. L'vov D. V. & Romanov V. I. O metodike rascheta na prochnost' pruzhin pri deystvii kombinirovannykh nagruzok [On the methodology for calculating the strength of springs under combined loads]. *Proceedings of VNIKTI* [Research and Design and Technology Institute of Rolling Stock], 1976, pp. 68–74. (In Russian)
- 11. GOST 34093–2017. Vagony passazhirskiye lokomotivnoy tyagi. Trebovaniya k prochnosti i dinamicheskim kachestvam [Passenger cars on locomotive traction. Requirements for structural strength and dynamic qualities]. Moscow, Standartinform Publ., 2017, 42 p. (In Russian)
- 12. Orlova A. M., Rudakova E. A. & Gusev A. V. Opredeleniye mekhanicheskikh svoystv stali pruzhin ressornogo podveshivaniya telezhek gruzovykh vagonov [Mechanical test of steel for freight bogie swing suspension springs]. *Izvestiia Petersburgskogo universiteta putei soobshcheniia* [*Proceedings of Petersburg Transport University*]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2016, iss. 3, pp. 380–386. (In Russian)
- 13. GOST 3565–80. Metally. Metod ispytaniya na krucheniye [Metals. Method of torsion test]. Moscow, Izdatel'stvo standartov [Publishing House of Standards], 1980, 17 p. (In Russian)
- 14. GOST 33211–2014. Vagony gruzovyye. Trebovaniya k prochnosti i dinamicheskim kachestvam [Freight wagons. Requirements to structural strength and dynamic qualities]. Moscow, Standartinform Publ., 2014, 93 p. (In Russian)
- 15. Orlova A. M., Rudakova E. A. & Gusev A. V. Sovremennaya kontseptsiya rascheta tsilindricheskikh pruzhin szhatiya [The modern concept of calculating coil compression springs]. *Materialy XIV mezhdunar.* nauch.-tekhn. konferentsii "Podvizhnoy sostav XXI veka: idei, trebovaniya, proyekty" [Proceedings of the 14th International Scientific and Technical Conference "Rolling stock of the 21st century: ideas, requirements, projects"]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2019, pp. 198–203. (In Russian)
- 16. Biezeno C. & Koch I. Die Knickung von Schraubenfedern. Z. A. M. M., 1925, vol. 5, pp. 279–280.
- 17. Sparing W.H. How much force to deflect a spring sideways. *Spring Design and Application*, 1961, pp. 336–337.

18. RD 32.51–95. Metodika rascheta na prochnost' pruzhin ressornogo podveshivaniya podvizhnogo sostava zheleznykh dorog pri deystvii prodol'nykh i kombinirovannykh nagruzok [Calculation method for strength of spring suspension coils of railway rolling stock under longitudinal and combined loads]. Regulatory document. Moscow, VNITI Publ., 1995, 44 p. (In Russian)

19. Orlova A. M., Rudakova E. A., Shevchenko D. V., Gusev A. V., Popovich S I. & Savushkin R. A. Analiz metodik rascheta gorizontal'noy zhestkosti pruzhin ressornogo podveshivaniya gruzovykh vagonov [Analysis of methods for calculating the horizontal stiffness of the freight car spring suspension coils]. *Izvestiia Petersburgskogo universiteta putei soobshcheniia* [*Proceedings of Petersburg Transport University*]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2019, vol. 16, iss. 2, pp. 191–201. (In Russian)

20. Orlova A. M., Sokolov A. M., Rudakova E. A., Shevchenko D. V., Gusev A. V. & Popovich S. I. Coil springs in suspensions of railway vehicles. *26th International symposium on Dynamics of Vehicles on Roads and Tracks. Programme and Proceedings*. Sweden, Gothenburg, 2019, paper no. 32.

21. Goncharov P. S., Artamonov I. A., Khalitov T. F., Dinisikhin S. V. & Sotnik D. E. *NX Advanced simulation*. *Engineering review*. Moscow, DMK Press, 2012, 504 p. (In Russian)

Received: March 04, 2020 Accepted: March 11, 2020

Author's information:

Anna M. ORLOVA – D. Sci. in Engineering, Deputy General Manager in Strategy&Products; aorlova@uniwagon.com

Ekaterina A. RUDAKOVA – PhD in Engineering, Leading Researcher, Head of the Department of Complex Studies of Crew and Track Interaction Dynamics; erudakova@tt-center.ru

Denis V. SHEVCHENKO – PhD in Engineering, Deputy Executive Director of Research;

dshevchenko@tt-center.ru

Artem V. GUSEV – PhD in Engineering, Senior Researcher; agusev@tt-center.ru

Grigoriy S. SHALPEGIN – Junior Engineer Researcher; gshalpegin@tt-center.ru

УДК 629.4.027.3

Влияние пространственных колебаний грузовых вагонов на движение состава и затраты энергетических ресурсов

Ю.В. Чернышева, В.А. Дубинский

Петербургский государственный университет путей сообщения, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: *Чернышева Ю. В., Дубинский В. А.* Влияние пространственных колебаний грузовых вагонов на движение состава и затраты энергетических ресурсов // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2020. – Т. 17. – Вып. 2. – С. 233–243. DOI: 10.20295/1815-588X-2020-2-233-243

Аннотация

Цель: Определение влияния пространственных колебаний на основное сопротивление движению состава и расход топливно-энергетических ресурсов. Методы: С использованием уравнения Лагранжа второго рода составлена система дифференциальных уравнений движения поезда. На основе предложенной математической модели поезда была реализована компьютерная имитационная модель движения поезда по неровностям пути, в пакете Simulink среды MATLAB. Результаты: Разработаны математическая и имитационная модель движения поезда по пути с неровностями. Определен вклад удельной силы сопротивления движению от пространственных колебаний при наличии неровностей пути в величину удельной силы основного сопротивления движению состава, что составляет 5-35% в зависимости от скорости движения. Влияние сопротивления движению от преодоления пространственных колебаний при наличии неровностей пути на расход топливноэнергетических ресурсов уменьшается с увеличением мощности, развиваемой локомотивом при движении. Практическая значимость: Полученные выражения и имитационная модель дает возможность определить численным способом величину силы основного сопротивления движению и влияние на нее пространственных колебаний вагонов в широком диапазоне в зависимости от состояния пути, скорости движения поезда, технического состояния механической части состава, влияние возможных конструктивных изменений вагона и других величин.

Ключевые слова: Пространственные колебания вагонов, динамика движения поезда, уравнения движения, грузовой состав, неровность пути, динамические свойства вагонов, затраты топливно-энергетических ресурсов.

Вопросам уменьшения расхода топливноэнергетических ресурсов на тягу поездов постоянно уделяется значительное внимание. Одним из путей энергоресурсосбережения является снижение сопротивления движению грузовых вагонов, которые вносят основной вклад в расходы на тягу. В то же время влияние особенностей конструкций вагонов при проведении тяговых расчетов учитывается лишь частично, через величину осевой нагрузки. Проведенные в последние годы исследования [1–4] показали, что на тягу поезда существенное влияние оказывают колебания вагонов при движении в составе поезда.

Цель работы – определение влияния пространственных колебаний на основное сопро-

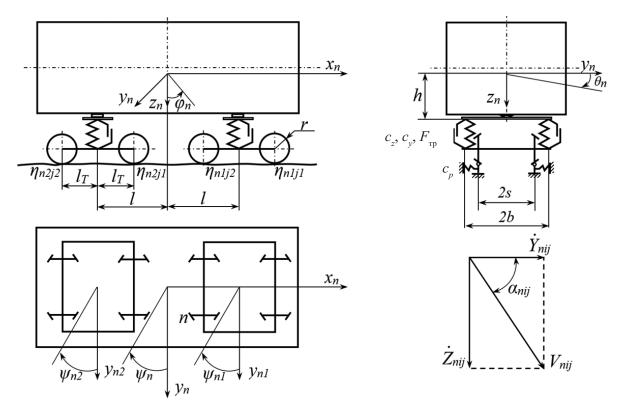


Рис. 1. Расчетная схема для изучения пространственных колебаний вагона

тивление движению состава и расход топливноэнергетических ресурсов.

Для этого разработана математическая модель движения поезда по неровностям пути, было принято, что:

- железнодорожный путь абсолютно жесткий в вертикальной плоскости и безинерционно упругий в горизонтальной плоскости;
- в горизонтальном направлении между колесами и рельсами действуют силы псевдоскольжения, а при выборе зазора между гребнем бандажа и рельсом возникают силы взаимодействия, зависящие от величины отжатия рельса;
 - вагон обладает 10 степенями свободы (K);
- все вагоны груженые и имеют однотипные ходовые части с равными жесткостями и коэффициентами трения;
- соединение между вагонами осуществляется автосцепками с шарнирами по концам, так что пространственные колебания каждого вагона являются независимыми и продольные перемещения всех вагонов равны.

Вследствие принятых допущений получена система дифференциальных уравнений $(K-1)\times N+1$ движения поезда, состоящего из N вагонов, обладающих 10 степенями свободы, в которой: $q_{n1}=z_n$ подпрыгивание кузова; $q_{n2}=y_n$ боковой относ кузова; $q_{n3}=\psi_n$ виляние кузова; $q_{n4}=\theta_n$ боковая качка кузова; $q_{n5}=\phi_n$ галопирование кузова вагона; $q_{n6}=y_{n1},q_{n7}=y_{n2}$ боковой относ каждой тележки вагона; $q_{n8}=\psi_{n1},q_{n9}=\psi_{n2}$ виляние каждой тележки вагона; $q_{n8}=\psi_{n1},q_{n9}=\psi_{n2}$ продольное перемещение поезда.

Схема пространственных колебаний вагона приведена на рис. 1.

Для исследования движения поезда были использованы уравнения Лагранжа второго рода. Вследствие принятых допущений полученная система дифференциальных уравнений движения поезда распалась на группы: из $(K-1)\times N+1$ уравнений, описывающих пространственные колебания вагонов состава поезда (9 уравнений для каждого вагона в составе):

$$\begin{split} m_{K}\ddot{z}_{n} + 4\cdot c_{z} \cdot z_{n} - c_{z} \sum_{i=1}^{2} \sum_{j=1}^{2} \eta_{nij} &= -F_{\tau p} \sum_{i,j=1}^{2} \frac{\dot{Z}_{nij}}{|V_{nij}|} + G_{K}, \\ J_{Ky}\ddot{\varphi}_{n} + 4l^{2}c_{z}\varphi_{n} + c_{z}l \sum_{i=1}^{2} \sum_{j=1}^{2} (-1)^{i-1} \eta_{nij} &= -F_{\tau p}l(-1)^{i+1} \sum_{i,j=1}^{2} (-1)^{i+1} \frac{\dot{Z}_{nij}}{|V_{nij}|}, \\ J_{kx} \cdot \ddot{\theta}_{n} + 4\theta_{n}(c_{z}b^{2} + c_{y}h^{2} - \frac{1}{4}G_{K}h) - 4c_{y}hy_{n} + 2c_{y}h \sum_{i=1}^{2} y_{ni} + c_{z}b \sum_{i=1}^{2} \sum_{j=1}^{2} (-1)^{j+1} \eta_{nij} &= F_{\tau p}h \sum_{i,j=1}^{2} \frac{\dot{Y}_{ij}}{|V_{ij}|} + \\ &+ F_{\tau p}b \sum_{i=1}^{2} \sum_{j=1}^{2} (-1)^{j+1} \frac{\dot{Z}_{nij}}{|V_{nij}|}, \\ m_{K}\ddot{y}_{n} + 4c_{y}y_{n} - 4c_{y}h\theta_{n} - 2c_{y} \sum_{i=1}^{2} y_{ni} &= -F_{\tau p} \sum_{i,j=1}^{2} \frac{\dot{Y}_{nij}}{|V_{nij}|}, \\ J_{kz}\ddot{\psi}_{n} + 4c_{y}l^{2}\psi_{n} - 2c_{y}l \sum_{i=1}^{2} (-1)^{i+1}y_{ni} &= -F_{\tau p}l \sum_{i,j=1}^{2} (-1)^{i+1} \frac{\dot{Y}_{nij}}{|V_{nij}|} - M_{\tau p} \sum_{i,j=1}^{2} \sin(\dot{\psi}_{n} - \dot{\psi}_{n}), \\ m_{T}\ddot{y}_{ni} - 2c_{y}y_{n} + 2c_{y}y_{ni} + 2c_{y}h\theta_{n} - 2c_{y}l(-1)^{i+1}\psi_{n} &= -4F \frac{1}{V}\dot{y}_{ni} + 4F\psi_{ni} + \\ &+ 2F_{\tau p} \sum_{i,j=1}^{2} \frac{\dot{Y}_{nij}}{|V_{nij}|} + c_{p}(y_{ni} + l\psi_{ni} \mp \frac{e}{2}) - c_{p}(y_{ni} - l\psi_{ni} \mp \frac{e}{2}), \end{split}$$

$$(1)$$

$$J_{Tz}\ddot{\psi}_{ni} = -4F_{\tau p} \frac{1}{V}(s^{2} + l_{T}^{2})\dot{\psi}_{ni} - 4F \frac{n}{r}sy_{ni} + M_{\tau p}sign(\dot{\psi}_{n} - \dot{\psi}_{ni}) - c_{p}(y_{ni} + l\psi_{ni} \mp \frac{e}{2}) - c_{p}(y_{ni} - l\psi_{ni} \mp \frac{e}{2})$$

и из одного уравнения, характеризующего продольную динамику поезда с учетом сил от преодоления пространственных колебаний при движении состава по неровностям пути:

$$Q\ddot{x} = F(\dot{x}) - W_o. \tag{2}$$

сила сопротивления движению от качения колеса по рельсу [5]; $W_{\rm H\Pi}{}^{\prime\prime} = -c_z \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 Z_{nij} \cdot \frac{\partial \eta_{nij}}{\partial x} - C_z \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \frac{\dot{Z}_{nij}}{|V_{nii}|} \cdot \frac{\partial \eta_{nij}}{\partial x}$ — сила сопротивления от движения по неровностям пути; $m_{_K}$ — масса ку-

зова вагона; m_T – масса тележки вагона; c_z , c_y – жесткости рессорного комплекта по осям z и y; J_{xx} , J_{xy} , J_{kz} – главные центральные моменты инерции кузова вагона; J_{my} – главный центральный момент инерции тележки вагона; c_p – поперечная жесткость рельсового пути; e – поперечный разбег колесных пар; n – конусность профиля бандажа; r – радиус колеса.

На основе предложенной математической модели была реализована компьютерная имитационная модель движения поезда по неровностям пути с помощью пакета Simulink среды MATLAB [6, 7]. Состав состоит из 56 вагонов модели 12-132 с осевой нагрузкой 23,5 т. В качестве расчетных входных возмущений, описывающих неровности пути, были использованы расчетные неровности, снятые с помощью вагона-путеизмерителя на различных участках [8] ($\eta_{nij} = 0.5 \sum_{k=1}^{2} \eta_{nijk}$ — расчетное возмущение для i-й тележки j-й стороны n-го вагона, k — номер колесной пары).

На рис. 2 представлены полученные в результате моделирования зависимости удельного основного сопротивления движению от скорости $W_0^\#(V)$.

Удельные силы сопротивления движению состава $W_o^{\#}(V)$ сравнивались с экспериментальными данными ВНИИЖТа [9] и расчетными данными ПТР [10].

Как видно, в зоне рабочих скоростей движения (60 км/ч по перегону — на участках 80 км/ч, согласно режимной карте) кривая 3 лежит ниже аналогичной кривой 2 на 2-10 %, а полученная путем моделирования кривая 1 лежит выше на 4-10 %.

Общий вид полученной кривой 1 качественно повторяет форму кривых 2 и 3.

В результате моделирования получена зависимость удельного сопротивления движению $W_{\rm HII}$, возникающая в продольном направлении поезда от пространственных колебаний при движении состава по неровностям пути для различных скоростей движения (рис. 3).

На рис. 4 представлена доля удельного сопротивления движению $W_{\rm HII}^{\ \ \prime\prime}$ от основного $W_{\rm o}^{\ \prime\prime}$

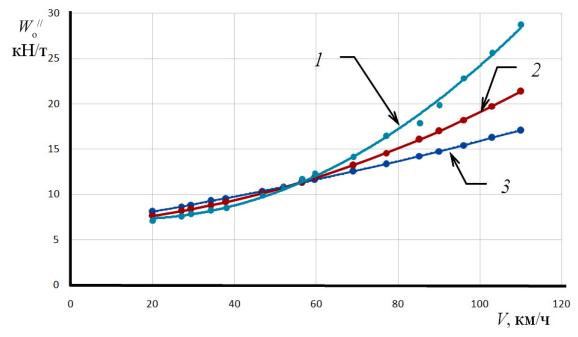


Рис. 2. Зависимости удельного основного сопротивления движению $W_{\circ}^{"}(V)$ с учетом удельного сопротивления движению от пространственных колебаний при движении по неровностям пути: $1-W_{\circ}^{"}(V)$ (расчет); 2- вычисления по расчетным формулам ПТР $W_{\circ}^{"}(V)$ (ПТР); 3- построения по опытным данным ВНИИЖТА $W_{\circ}^{"}(V)$ (ВНИИЖТ)

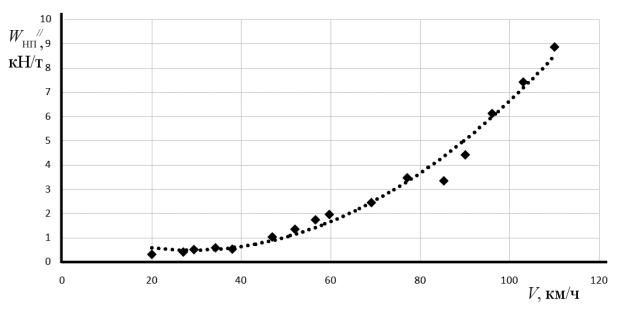


Рис. 3. Зависимость удельного сопротивления движению состава от преодоления пространственных колебаний, возникающих при прохождении по неровностям пути от скорости движения $W_{\rm HII}^{-\prime\prime}(V)$

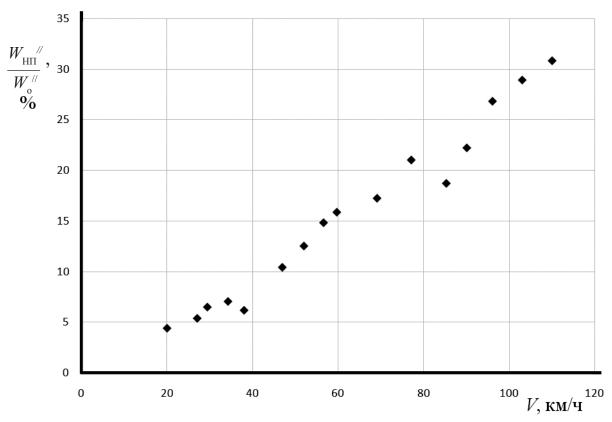


Рис. 4. Зависимость доли удельного сопротивления движению $W_{\rm HII}{}''$ от основного сопротивления движению $W_{_{\rm o}}{}''$ в зависимости от скорости движения состава V

в зависимости от скорости движения состава. Она составляет от 5 до 35%.

Для приближенной оценки влияния увеличения основного сопротивления движению состава за счет пространственных колебаний при движении по неровностям пути на расход топливно-энергетических ресурсов были сопоставлены силы сопротивления движению состава, состоящего из 56 вагонов с осевой нагрузкой 23,5 т с тяговой характеристикой современного

локомотива 2ЭС5К [10]. На рис. 5 приведены тяговые характеристики для электровоза 2ЭС5К и кривые сил основного сопротивления движению состава при различных уклонах в следующих вариантах: 1) с учетом пространственных колебаний при наличии неровностей пути; 2) без учета.

Как видно, влияние увеличения сопротивления движению от преодоления пространственных колебаний при движении по неровностям

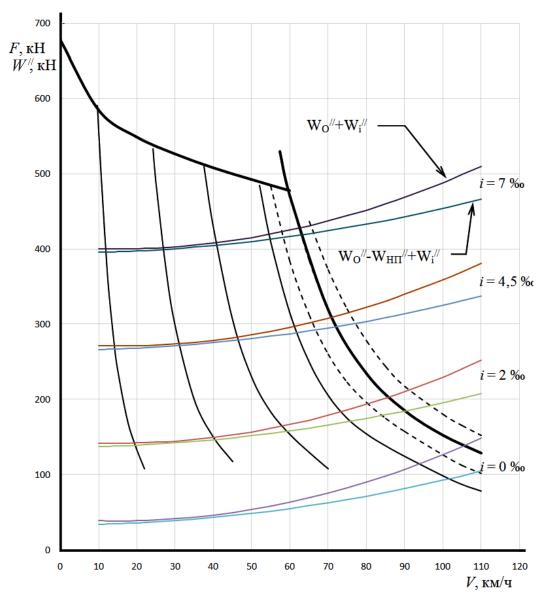


Рис. 5. Тяговые характеристики для электровоза 2ЭС5К и кривые сил основного сопротивления движению в зависимости от скорости движения, полученные с учетом пространственных колебаний при наличии неровностей пути и без него

пути на расход энергетических ресурсов уменьшается с увеличением мощности, развиваемой электровозом при движении поезда по участку.

Ввиду того, что электровоз имеет ограничение по мощности, было промоделировано движение поезда с электровозом, работающим в режиме наибольшей тяги.

На рис. 6, A—B наглядно показаны изменения силы тяги, ускорения и скорости состава от времени движения в сравнении с учетом влияния пространственных колебаний состава при движении по неровностям пути и без него.

Из рис. 6, B видно, что мощность локомотива будет расходоваться на преодоление пространственных колебаний при движении по неровностям пути вместо потребления ее для дальнейшего увеличения скорости.

Расход электроэнергии на тягу поезда зависит как от профиля пути и энергетических параметров локомотива, так и от способа управления силой тяги локомотива.

При движении грузового поезда пространственные колебания вагонов, вызванные слу-

В результате проделанного исследования пришли к следующим выводам:

- разработана математическая и имитационная модель движения поезда по пути с неровностями;
- определен вклад удельной силы сопротивления движению от пространственных колебаний при наличии неровностей пути в величину удельной силы основного сопротивления дви-

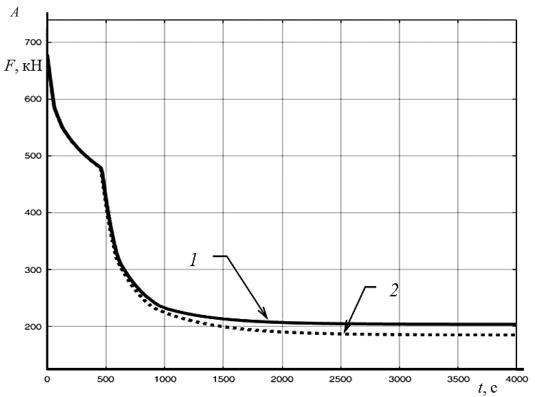
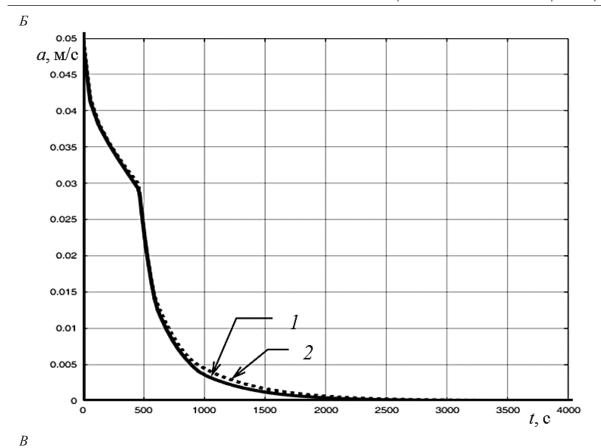
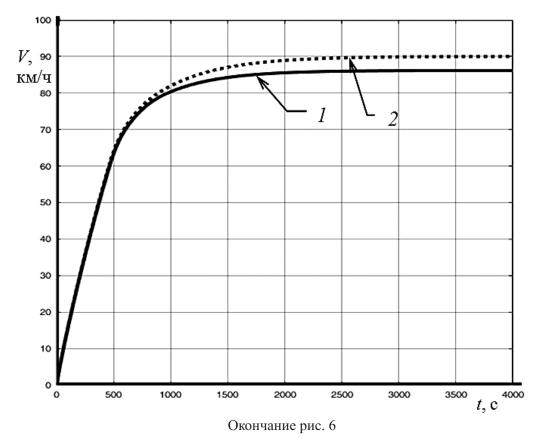


Рис. 6. Зависимости силы тяги (A), ускорения (B), скорости (B) от времени с учетом влияния пространственных колебаний состава при движении по неровностям пути (1) и без него (2)





жению состава, что составляет 5–35% в зависимости от скорости движения;

– влияние сопротивления движению от преодоления пространственных колебаний при наличии неровностей пути на расход топливно-энергетических ресурсов уменьшается с увеличением мощности, развиваемой локомотивом при движении.

Библиографический список

- 1. Бороненко Ю. П. Влияние колебаний вагонов на энергозатраты на тягу поезда / Ю. П. Бороненко, А. Н. Комарова, Ю. С. Ромен // Бюл. результатов науч. исследований. 2016. Вып. 1(18). С. 18—29.
- 2. Комарова А. Н. Влияние типа и параметров гасителей колебаний вагона на сопротивление движению / А. Н. Комарова, Ю. П. Бороненко // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. СПб. : ПГУПС, 2014. Вып. 2 (39). С. 35—41.
- 3. Комарова А. Н. Сравнительная оценка сопротивления движению грузовых вагонов на тележках различных типов / А. Н. Комарова, Ю. П. Бороненко // Транспорт Российской Федерации. СПб.: ООО «Т-Пресса», 2014. Вып. 2 (23). С. 69—72.
- 4. Кошелев В. А. Динамические свойства и колебания вагонов / В. А. Кошелев, Л. И. Челнокова, Г. Е. Сорокин. СПб. : ПГУПС, 2003. 37 с.
- 5. Астахов П. Н. Сопротивление движению железнодорожного подвижного состава / П. Н. Астахов // Труды ВНИИЖТ. М.: Транспорт, 1966. Вып. 311. С. 179.

- 6. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. СПб.: Питер, 2008. 288 с.
- 7. Черных И. В. Simulink: Инструмент моделирования динамических систем. URL: http://matlab.exponenta.ru/simulink/book1/index.php (дата обращения: 10.01.2020 г.).
- 8. Орлова А. М. Обоснование выбора расчетных неровностей железнодорожного пути для оценки показателей динамических качеств вагона / А. М. Орлова, А. Н. Комарова, Е. А. Рудакова и др. М.: Техника железных дорог, 2019. Вып. 2 (46). С. 36–42.
- 9. Проведение испытаний и получение исходных данных для расчета экономического эффекта от эксплуатации грузовых инновационных вагонов модели 12-9548-01 с осевой нагрузкой 27 т в соответствии с «Методикой оценки экономической эффективности эксплуатации грузовых инновационных вагонов на железнодорожной инфраструктуре российских железных дорог» : отчет о НИР. Утв. Минтрансом РФ / сост. : Н. Н. Широченко, А. С. Беляев, А. А. Новиков и др. М. : АО «НИИЖТ», 2017.
- 10. Правила тяговых расчетов для поездной работы. Утв. ст. вице-президентом ОАО «РЖД» В. А. Гапановичем 26.12.2013 г. М. : Транспорт, 1985. 287 с.

Дата поступления: 29.01.2020 г. Решение о публикации: 06.02.2020 г.

Контактная информация:

ЧЕРНЫШЕВА Юлия Владимировна – ст. преподаватель; juliachernysheva@bk.ru ДУБИНСКИЙ Владимир Александрович – канд. техн. наук, доцент; vdubinski@yandex.ru

Effect of cargo wagons' spatial variation on train movement and consumption of energy resources

Iu. V. Chernysheva, V. A. Dubinsky

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Chernysheva Iu. V., Dubinsky V.A. Effect of cargo wagons' spatial variation on train movement and consumption of energy resources. *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2020, vol. 17, iss. 2, pp. 233–243. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2020-2-233-243

Summary

Objective: Determine the effect of spatial variation on net train resistance and on consumption of fuel and energy resources. **Methods:** A differential equation system was composed for train movement using the Lagrange equation of the second kind. A computer simulation model of train movement over track irregularities was implemented in the Simulink software suite of the MATLAB environment on the basis of the proposed mathematical model of the train. **Results:** A mathematical and simulation model of train movement over track irregularities was developed. The input of specific force of movement resistance from spatial variation in case of presence of track irregularities to specific force intensity of net train resistance is determined at between 5 and 35 per cent, depending on movement speed. The effect of movement resistance from passing spatial variation caused by track irregularities reduces with the increase of capacity output developed by a locomotive during the movement. **Practical importance:** The formulae and the imitation model allow determination by numerical method of the value of net movement resistance force and the effect on it from spatial variation of wagons in a wide range depending on track condition, train movement speed, technical condition of the engineering parts of the train, influence of possible changes to the wagon's design and other values.

Keywords: Spatial variation of wagons, train dynamics, equations of movement, cargo train, track irregularity, dynamic properties of wagons, consumption of fuel and energy resources.

References

- 1. Boronenko Iu. P., Komarova A. N. & Romen Iu. S. Vliianie kolebanii vagonov na energozatraty na tiagu poezda [Effect of wagon variation on power consumption for haulage operation]. *Biulleten' rezul' tatov nauchnykh issledovanii* [*Bulletin of scientific research results*], 2016, iss. 1 (18), pp. 18–29. (In Russian)
- 2. Komarova A. N. & Boronenko Iu. P. Vliianie tipa i parametrov gasitelei kolebanii vagona na soprotivlenie dvizheniiu [Effect of type and parameters of wagon shock absorbers on movement resistance]. *Izvestiia Petersburgskogo universiteta putei soobshcheniia* [*Proceedings of Petersburg Transport University*]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2014, iss. 2 (39), pp. 35–41. (In Russian)
- 3. Komarova A. N. & Boronenko Iu. P. Sravnitel'naia otsenka soprotivleniia dvizheniiu gruzovykh vagonov na telezhkakh raznykh tipov [Comparative movement resistance assessment of cargo wagons on bogies of various types]. *Transport Rossiiskoi Federatsii* [*Transport of the Russian Federation*]. Saint Petersburg, T-Pressa Publ., 2014, iss. 2 (23), pp. 69–72. (In Russian)

- 4. Koshelev V.A., Chelnokova L.I. & Sorokin G.E. *Dinamicheskie svoistva i kolebaniia vagonov [Wagon dynamic properties and variations*]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2003, 37 p. (In Russian)
- 5. Astakhov P. N. Soprotivlenie dvizheniiu zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava [Resistance to movement of railway rolling stock]. *Trudy VNIIZhT* [*Proc. of the All-Union Railway Research Institute*]. Moscow, Transport Publ., 1966, iss. 311, p. 179. (In Russian)
- 6. Chernykh I. V. Modelirovanie elektrotekhnicheskikh ustroistv v MATLAB, SimPowerSystems i Simulink [Modelling electrical devices in MATLAB, SimPowerSystems and Simulink]. Saint Petersburg, Piter Publ., 2008, 288 p. (In Russian)
- 7. Chernykh I. V. Simulink: Instrument modelirovaniia dinamicheskikh system [Simulink: an instrument for modelling dynamic systems]. Available at: http://matlab.exponenta.ru/simulink/book1/index.php (accessed: 10.01.2020) (In Russian)
- 8. Orlova A. M., Komarova A. N., Rudakova E. A. et al. Obosnovanie vybora raschetnykh nerovnostei zheleznodo-

rozhnogo puti dlia otsenki pokazatelei dinamicheskikh kachestv vagona [Rationale for selection of computed irregularities of railway track for evaluation of dynamic properties of a wagon]. *Tekhnika zheleznykh dorog* [*Railway engineering*]. Moscow, OPZhT Publ., 2019, iss. 2 (46), pp. 36–42. (In Russian)

9. Provedenie ispytanii i poluchenie iskhodnykh dannykh dlia rascheta ekonomicheskogo effekta ot ekspluatatsii gruzovykh innovatsionnykh vagonov modeli 12-9548-01 s osevoi nagruzkoi 27 t v sootvetstvii s "Metodikoi otsenki ekomicheskoi effektivnsti ekspluatatsii gruzovykh innovatsionnykh vagonov na zheleznodorozhnoi infrastrukture rossiiskikh zheleznykh dorog" [Conducting tests and obtaining input data for calculation of economic effect from operation of the model 12-9548-01 innovative cargo wagons with axial load of 27 tonnes in accordance to the 'Principles for evaluation of economic efficiency from operation of innovative cargo

wagons on Russian railways' rail infrastructure']. Research record. Approved by the Russian Federation Transport Ministry. Compiled by N. N. Shirochenko, A. S. Beliaev, A. A. Novikov et al. Moscow, AO NIIZhT [Railway Research Institute] Publ., 2017. (In Russian)

10. Pravila tiagovykh raschetov dla poedznoi raboty [Rules for train performance of road service]. Approved by the senior vice president of the Russian railways JCS V.A. Gapanovich Dec. 26, 2013. Moscow, Transport Publ., 1985, 287 p. (In Russian)

Received: January 29, 2020 г. Accepted: February 06, 2020 г.

Author's information:

 $\label{eq:linear_professor} Iuliia~V.~CHERNYSHEVA-Assistant~Professor; juliachernysheva@bk.ru$

Vladimir A. DUBINSKY – PhD in Engineering, Senior Lecturer; vdubinski@yandex.ru

ОБЩЕТЕХНИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

УДК 504:311

Утилизация продуктов сноса зданий и сооружений при рекультивации гранитных карьеров с использованием мультимодальной логистики

Е.М. Боденко, М.В. Шершнева

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: *Боденко Е. М., Шершнева М. В.* Утилизация продуктов сноса зданий и сооружений при рекультивации гранитных карьеров с использованием мультимодальной логистики // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2020. — Т. 17. — Вып. 2. — С. 244—251. DOI: 10.20295/1815-588X-2020-2-244-251

Аннотация

Цель: Исследование возможности применения мультимодальной логистики для использования продуктов сноса при рекультивации нарушенных территорий, например гранитных карьеров, актуальность которой обусловлена необходимостью, с одной стороны, рекультивации нарушенных территорий, образующихся в результате строительной деятельности, с другой – поиска полезного использования продуктов сноса зданий и сооружений. Геоэкологическое, технологическое и экономическое прогнозирование мероприятий мультимодальной логистики продуктов сноса городской агломерации позволяет разработать наиболее оптимальные схемы их полезного использования. Методы: Применялись методы математического моделирования (статистических решений, анализа и испытаний, «игры с природой»), методы машинной имитации, эмпирические методы сбора информации и данных, решение транспортной задачи. Результаты: Разработаны математические модели прогнозирования формирования транспортно-логистической цепи вывоза продуктов сноса с объектов. Впервые предложена схема выбора способа перемещения продуктов сноса в зависимости от дальности места захоронения для принятия решений по их вывозу в процессе проектирования мероприятий по рекультивации гранитных карьеров с точки зрения геоэкологической и экономической целесообразности. Практическая значимость: Продукты сноса могут служить заполнителями отработанных гранитных карьеров для временного хранения, частичного или полного заполнения с последующей рекультивацией отработанных карьеров.

Ключевые слова: Продукты сноса, логистика, рекультивация, модель, гранитный карьер.

Введение

Для крупных городов и городских агломераций к наиболее сложным проблемам защиты окружающей среды и сохранения геоэкологического равновесия относится управление процессами утилизации и вывоза отходов к местам утилизации или переработки. Из всего объема отходов значительную долю составляют про-

дукты сноса зданий и сооружений в объемах, на порядок превышающих объемы образования твердых бытовых отходов [1–5]. Одновременно активное развитие строительной отрасли приводит к возникновению геоэкологической проблемы рекультивации нарушенных территорий, образующихся при исчерпании природных материалов, применяемых в строительстве, таких как песок, гранит или глина [6, 7]. Так, на тер-

ритории Северо-Западного региона находятся порядка 10 гранитных карьеров, занимающих площадь до 3 тыс. га и требующих рекультивации. Продукты сноса зданий и сооружений наиболее близки по природе к гранитному камню, что позволяет прогнозировать их применение при рекультивации гранитных карьеров [8—12].

Для решения более полного использования продуктов сноса важны количественная и качественная оценки их объемов и регулируемое, обоснованное решение вопросов утилизации, захоронения или вторичного использования. Такие оценки, а также геоэкологическое, технологическое и экономическое обоснование мероприятий по использованию продуктов сноса можно осуществить с помощью мультимодальной логистики.

Материал и методы

Объектом исследования служили продукты сноса зданий и сооружений. Изучаются возможности мультимодальной логистики для обоснования мероприятий по утилизации продуктов сноса зданий и сооружений при рекультивации гранитных карьеров. Были использованы методы математического моделирования (статистические решения, анализа и испытаний, «игры с природой»), эмпирические методы сбора информации и данных, методы машинной имитации, решение транспортной задачи.

Результаты исследования

В соответствии с законодательством Российской Федерации территории, нарушенные в результате деятельности человека, подлежат восстановлению для последующего использования в народно-хозяйственной деятельности, т. е., например, после исчерпания запаса гранита арендаторы обязаны проводить рекультивационные мероприятия. Однако в настоящее время большая часть гранитных карьеров после изъятия

породы остаются в виде открытой выработки. Чаще всего отработанные карьеры заполняются мусором различного происхождения (стихийные свалки).

Среди твердых минеральных отходов, образующихся при осуществлении строительной и хозяйственной деятельности, наиболее близки по химической природе и физико-механическим характеристикам к гранитному камню продукты сноса зданий и сооружений (табл. 1 и 2).

В качестве объекта рекультивации был выбран гранитный карьер «Возрождение» НП «ГПСК "Возрождение"» пос. Кузнечное Выборгского района Ленинградской обл. Приведем его характеристики:

Объект – карьерная выработка

Размер карьера, км

(ширина, рабочая высота) $<1,0 \times 0,7$

Площадь карьера, га

Рабочие расстояния

От Санкт-Петербурга 159

(объект Дачное 5), км (ж.-д. сообщение)

149

(автомагистрали)

51

Для исследования вопроса образования объемов продуктов сноса для обеспечения заполнения гранитных карьеров была построена расчетная карта объектов формирования продуктов сноса, учитывающая оценку вероятности надежности вывоза их с объектов. Была построена аналоговая схема вывоза продуктов сноса с объекта, в которой принимаются во внимание такие данные как объем и вес продуктов сноса, а также дальность расположения объектов образования продуктов сноса относительно места их захоронения в гранитных карьерах.

Результаты работы имитационной модели транспортной мультимодальной цепи перевозки продуктов сноса зданий и сооружений приведены в табл. 3.

Отличительной особенностью разработанной модели является учет важных геоэкологических факторов:

ТАБЛИЦА 1. Химический состав продуктов сноса зданий и сооружений и природного гранита

Химический состав	Продукты сноса,%	Гранит, %
Диоксид кремния (SiO ₂)	73,5755	70,18
Оксид алюминия (Al ₂ O ₃)	3,7235	14,47
Триоксид железа (Fe ₂ O ₃)	1,3016	1,57
Оксид кальция (СаО)	14,073	1,99
Оксид магния (MgO)	0,3549	0,88
Сернистый ангидрид (SO ₃)	0,657	0,12
Оксид железа (FeO)	0,1225	1,78
Оксид калия (К2О)	0,162	4,11
Оксид натрия (Na2O)	0,065	3,48
Вода (H ₂ O)	5,75	0,84

ТАБЛИЦА 2. Физико-механические характеристики продуктов сноса зданий и сооружений и природного гранита

Показатели	Материал		
Показатели	Гранит	Бой бетона	
Плотность, г/см ³	3,17	2,2–2,5	
Предел прочности при сжатии в водонасыщенном состоянии, кг/см ²	550	350	
Водопоглощение,%	0,2	4–8	
Морозостойкость, цикл	25	50-500	
Коэффициент снижения прочности	0,9	1,4	
Твердость	6–7 (по Моосу)	6-8 (по шкале Протодьяконова)	
Истираемость, г/см ²	1,4	1,2	

- 1) существующие методики сноса/разбора зданий;
- 2) способы заполнения строительных контейнеров продуктами сноса;
- 3) выбор грузовых автотранспортных средств, перевозящих контейнеры с продуктами сноса с учетом городской дорожной инфраструктуры;
- 4) отдаленность объекта заполнения от места образования продуктов сноса;
- 5) рациональность организации утилизации продуктов сноса.

Согласно проведенным исследованиям и полученным в результате работы имитационной модели данным, следует, что с большинства объектов, которые были определены в соответст-

вии с удаленностью от места захоронения на территории Северо-Запада, можно вывозить продукты сноса и автомобильным, и железнодорожным транспортом.

Для построения расчетной схемы вывоза строительных отходов были учтены такие данные:

- отдаленность объекта сноса от места их захоронения (гранитные карьеры пос. Кузнечное Ленинградской обл.);
- время на перевозку продуктов сноса с места образования строительных отходов к месту их захоронения;
 - стоимость перевозки продуктов сноса.

При заполнении гранитного карьера по максимальной точке объема/высоты образуется зна-

ТАБЛИЦА 3. Результаты работы имитационной модели транспортной мультимодальной цепи перевозки

Характеристика	Транспортное средство				
Объем, м ³	20		27		
Габаритные размеры (Д×Ш×В), мм	2500×6285×1682		2500×6285×2190		
Вес, кг	22	250	2530		
Грузовые	автомобили со смені	ным кузовом			
Марка автомобиля	КАМАЗ МСК-16-01 (МССО-01) (с механизмом подъемного устройства для сменных кузовов)		VOLVO F12		
Модель	KAMA3-65115				
Грузоподъемность шасси с механизмом платформ, кг	15450	30 000	13 000		
Экологический класс	4	Euro-3	Euro-3		
Масса автомобиля, кг:	7200				
снаряженная	9600	8500			
полная	25 200	18200	27 000		
Габаритные размеры автомобиля Д×Ш×В, мм	7660×2500×2870 5887×2495×3906		2400×2480×3428		
	Думпкары				
Тип		Вагон-самосвал			
Модель	Модель 31-945 (Думпкар 2 ВС-66)	Модель 33-9035 (Думпкар 2 ВС-105)	Модель 34-9023		
Грузоподъемность, т	66	105	150		
Масса тары, т	28	51	70		
Максимальная нагрузка от колесной пары на рельс, кН (тс)	230,85 (23,25)	254,97 (26)	269,68 (27,5)		
Объем кузова по высоте борта, м ³	36	50	60		
Длина по осям сцепления автосцепок, мм	11 830	15 036	18400		
Ширина максимальная, мм	3240	3518	3330		
Высота от уровня головок рельсов, мм	3205	3322	3480		
Вид разгрузки	Двухсторонний				
Система разгрузки	Пневматическая				

чительная территория, которая после биологической рекультивации может быть использована для лесотехнических целей в качестве лесопитомника или лесотехнической территории (восстановление геоэкологической системы в конкретном регионе).

При известном количестве сносимых зданий возможно определить объем и массу образующихся продуктов сноса.

При выборе объема контейнера с помощью комплекса программных модулей учитываются немаловажные факторы, такие как:

- инфраструктура объекта/территории в городской черте запрещен проезд крупногабаритной техники без специального разрешения, а также автомобилей большой грузоподъемности;
- время работ с повышенным уровнем шума в Санкт-Петербурге, согласно закону о «Тишине», все строительные и шумные работы проводятся с 8 до 22 ч;
- экологическая нагрузка на территорию объекта сноса и дорожную цепь вывоза строительных отходов должна быть минимальной закрытые контейнеры при перевозке минимизируют нагрузку на окружающую среду, так как пыль от строительных отходов на пути следования автомобильного транспорта не превышает допустимых предельных значений;
- грузоподъемность автотранспортных средств определяется в соответствии с дорожными требованиями, в условиях городской дорожной инфраструктуры накладывается ряд ограничений на вес и грузоподъемность автомобилей и их габаритные размеры;
- объем строительных контейнеров не должен превышать 32 м³, самым распространенным объемом является 27 м³, который устанавливается на любой тип автомобилей, предназначенных для вывоза контейнеров.

Заключение

Геоэкологическое, технологическое и экономическое прогнозирование мероприятий муль-

тимодальной логистики продуктов сноса городской агломерации позволяет разработать наиболее оптимальные схемы их использования.

Впервые разработаны математические модели прогнозирования формирования транспортно-логистической цепи вывоза продуктов сноса с объектов с учетом методик сноса/разбора зданий, способов заполнения строительных контейнеров продуктами сноса и отдаленностью объекта заполнения от места образования продуктов сноса.

Впервые разработана схема выбора способа перемещения продуктов сноса в зависимости от дальности места захоронения для принятия решений по их вывозу в процессе проектирования мероприятий по рекультивации гранитных карьеров с точки зрения геоэкологической и экономической целесообразности.

Обосновано применение продуктов сноса в качестве заполнителей отработанных гранитных карьеров для временного хранения, частичного или полного заполнения с последующей рекультивацией отработанных карьеров.

Библиографический список

- 1. Шершнева М. В. Научные основы технологий утилизации силикатсодержащих отходов : дис. ... д-ра техн. наук / М. В. Шершнева. СПб.: ПГУПС, 2009. 304 с.
- 2. Сычева А. М. Золопенобетон с использованием золы осадка сточных вод / А. М. Сычева, А. В. Хитров, Е. В. Русанова и др. // Цемент и его применение. 2006.- N 2.- C. 64.
- 3. Дробышев Д.И. Инженерно-химические основы получения резательных пеноавтоклавных изделий и их геозащитные свойства / Д.И. Дробышев, И.П. Филатов, А.В. Хитров, М.В. Шершнева, В.Я. Соловьева, В.А. Чернаков, В.Д. Мартынова. СПб.: ПГУПС, 2009. 81 с.
- 4. Сватовская Л. Б. Эко- и геоэкозащита природнотехногенных систем. Теория и практика/Л.Б. Сватовская, М. В. Шершнева, М. М. Байдарашвили, А. М. Сычева, Д. С. Старчуков, А. С. Сахрова, О. В. Юров, А. А. Кабанов, Н. Н. Ефимова, А. Б. Бобровник, Н. А. Шред-

- ник, С.В. Симонюк, К.С. Мальчевская, М. Абу-Хасан. – СПб. : ПГУПС, 2016. – 62 с.
- 5. Масленникова Л. Л. Технология утилизации осадка природных вод / Л. Л. Масленникова, Н. А. Бабак, Д. Н. Бухарина, М. В. Шершнева // Экология урбанизированных территорий. 2008. № 3. С. 82–85.
- 6. Сватовская Л.Б. Инженерно-химические и естественно-научные основы создания новых эко- и геозащитных технологий / Л.Б. Сватовская, Л.Л. Масленникова, Е.И. Макарова, Н.А. Бабак, М.В. Шершнева. СПб.: ПГУПС, 2011. 89 с.
- 7. Патент на изобретение RU № 2306301С1. Жаростойкий шлакощелочной пенобетон / Л. Б. Сватовская, Л. Л. Масленникова, М. Абу-Хасан, М. В. Шершнева, А. Г. Кияшко, Д. Н. Бухарина. Заявка № 2006104395/03 от 13.02.2006 г. Опубл. 20.09.2007 г. Бюл. № 11.
- 8. Сватовская Л. Б. Применение индикаторного метода новое перспективное направление для выбора компонентов экозащитных систем для транспорта / Л. Б. Сватовская, Н. И. Якимова, М. В. Шершнева, М. М. Байдарашвили // Наука и техника транспорта. 2004. N 2. C. 12-17.
- 9. Шершнева М. В. Фундаментальная природа гидратсодержащих твердых фаз в развитии детокси-кационных технологий / М. В. Шершнева // Инновационные технологии в строительстве и геоэкологии. Материалы I Междунар. науч.-практич. конференции. СПб. : ПГУПС, 2014. С. 15–17.

- 10. Сватовская Л.Б. Инновационные естественнонаучные технические решения в строительной деятельности / Л.Б. Сватовская, В.Я. Соловьева, М.С. Абу-Хасан, М.В. Шершнева, Л.Л. Масленникова, М.М. Байдарашвили // Перспективы будущего в образовательном процессе: сб. тезисов национальной науч.-технич. конференции. — 2017. — С. 108— 109.
- 11. Сватовская Л. Б. Инженерно-химические основы геозащиты природно-техногенных систем / Л. Б. Сватовская, М. Н. Латутова, А. М. Сычева, М. В. Шершнева, А. А. Кондрашов, М. Ю. Савельева // Транспортное строительство. 2012. № 12. С. 20—21.
- 12. Сватовская Л. Б. Геоэкозащитные свойства технологических решений в транспортном строительстве от воздействия органических загрязнений / Л. Б. Сватовская, М. В. Шершнева, Е. В. Русанова, М. Ю. Савельева // Естественные и технические науки. -2015. -№ 11(89). -C. 304–306.

Дата поступления: 02.03.2020 г. Решение о публикации: 10.03.2020 г.

Контактная информация:

БОДЕНКО Елена Михайловна – аспирант; scherschneva@rambler.ru ШЕРШНЕВА Мария Владимировна – д-р техн. наук, профессор; scherschneva@rambler.ru

Utilisation of demolition waste in reclamation of granite quarries using multi-modal logistics

E. M. Bodenko, M. V. Shershneva

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: *Bodenko E. M., Shershneva M. V.* Utilisation of demolition waste in reclamation of granite quarries using multi-modal logistics. *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2020, vol. 17, iss. 2, pp. 244–251. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2020-2-244-251

Summary

Objective: Relevance of a study of the possibility of applying multi-modal logistics for using demolition waste in reclamation of disturbed land, such as granite quarries, stems from the need for reclamation

of disturbed land produced as a result of construction activities, on the one hand, and from the search for useful utilization of demolition waste. Geo-ecological, technological and economic forecasting of actions of multi-modal logistics for the urban agglomeration demolition waste products allows developing optimum patterns of their useful utilisation. **Methods:** Methods of mathematical modelling (statistical decisions, analysis and testing, nature games), simulation modelling, empirical methods of collection of information and data, and solving transportation problems were applied. **Results:** Mathematical models for forecasting the forming of a transport and logistics chain for removal of demolition waste products from sites were proposed. A scheme for selection of a method for transportation of demolition waste products depending on the remoteness of a burial location is proposed for the first time, allowing decision-making regarding removal in the process of designing actions for reclamation of granite quarries from the point of view of geo-ecological and economic practicability. **Practical importance:** Demolition waste can serve as fillers of depleted granite quarries for temporary storage, complete or partial filling, followed by reclamation of depleted quarries.

Keywords: Demolition products, logistics, reclamation, model, granite quarry.

References

- 1. Shershneva M. V. Nauchnye osnovy tekhnologii utilizatsii silikatsoderzhashchikh otkhodov [Scientific foundations for technologies of utilization of waste containing silicate]. Dr. Sci. Eng. dissertation. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2009, 304 p. (In Russian)
- 2. Sycheva A. M., Khitrov A. V., Rusanova E. V. et al. Zolopenobeton s ispol'zovaniem zoly osadka stochnykh vod [Aerated ash-concrete utilizing sewage sludge ash]. *Tsement i ego primenenie* [Concrete and its application], 2006, no. 3, p. 64. (In Russian)
- 3. Drobyshev D. I., Filatov I. P., Khitrov A. V., Shershneva M. V., Solov'eva V. Ia., Chernakov V. A. & Martynova V. D. *Inzhenerno-khimicheskie osnovy polucheniia rezatel 'nykh penoavtoklavnykh izdelii i ikh geozashchitnye svoistva* [Engineering and chemical foundations of manufacturing of cutting foam-autoclave products and their geoprotective properties]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2009, 81 p. (In Russian)
- 4. Svatovskaia L. B., Shershneva M. V., Baidarashvili M. M., Sycheva A. M., Starchukov D. S., Sakhrova A. S., Iurov O. V., Kabanov A. A., Efimova N. N., Bobrovnik A. B., Shrednik N. A., Simoniuk S. V., Mal'chevskaia K. S. & Abu-Khasan M. *Eko- i geozashchita prirodno-tekhnogennykh sistem. Teoriia i praktika* [*Eco- and geo-protection of natural and man-made systems. Theory and practice*]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2016, 62 p. (In Russian)

- 5. Maslennikova L. L., Babak N. A., Bukharina D. N. & Shershneva M. V. Tekhnologiia utilizatsii osadka prirodnykh vod [Technology for utilisation of natural waters sludge]. *Ekologiia urbanizirovannykh territorii* [*Urbanised territories' ecology*], 2008, no. 3, pp. 82–85. (In Russian)
- 6. Svatovskaia L. B., Maslennikova L. L., Makarova E. I., Babak N. A. & Shershneva M. V. *Inzhenerno-khimicheskie i estestvenno-nauchnye osnovy sozdaniia novykh eko- i geozashchitnykh tekhnologii* [Chemical engineering and natural-scientific foundations for creating new eco- and geo-protective technologies]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2011, 89 p. (In Russian)
- 7. Svatovskaia L. B., Maslennikova L. L., Abu-Khasan M., Shershneva M. V., Kiiashko A. G. & Bukharina D. N. *Patent na izobretenie RU no. 2306301S1. Zharostoikii shlakoshchelochnoi penobeton [Patent for invention RU N 2306301S1. Heat-resistant slag-lime aerated concrete*]. Application no. 2006104395/03 from Feb. 13, 2006. Published on Sep. 20, 2007. Bull. no. 11. (In Russian)
- 8. Svatovskaia L.B., Iakimova N.I., Shershneva M.V. & Baidarashvili M.M. Primenenie indikatornogo metoda novoe perspektivnoe napravlenie dlia vybora komponentov ekozashchitnykh sistem dlia transporta [Application of indicator method as a new promising trend in selection of components of eco-protection systems for transport. *Nauka i tekhnika transporta* [*Transport science and technology*], 2004, no. 2, pp. 12–17. (In Russian)

- 9. Shershneva M. V. Fundamental'naia priroda gidratsoderzhashchikh tverdykh faz v razvitii detoksikatsionnykh tekhnologii [Fundamental nature of hydrateincluding solid phases in development of detoxification technologies]. *Innovatsionnye tekhnologii v stroitel'stve i geoekologii [Innovative technologies in construction and geo-ecology]*. *Proc. of the 1st Intern. Sci. and Practical Conference*. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2014, pp. 15–17. (In Russian)
- 10. Svatovskaia L.B., Solov'eva V. Ia., Abu-Khasan M. S., Shershneva M. V., Maslennikova L. L. & Baidarashvili M. M. Innovatsionnye estestvenno-nauchnye technicheskie resheniia v stroitel'noi deiatel'nosti [Innovative natural-science engineering solutions in construction activity]. *Perspektivy budushchego v obrazovatel'nom protsesse* [*Prospects of the future in educational process*]. Collected abstracts of national research and technical conference, 2017, pp. 108–109. (In Russian)
- 11. Svatovskaia L. B., Latutova M. N., Sycheva A. M., Shershneva M. V., Kondrashov A. A. & Savel'eva M. Iu.

- Inzhenerno-khimicheskie osnovy geozashchity prirodnotekhnogennykh sistem [Chemical-engineering foundations of geo-protection of natural and man-made systems]. *Transportnoe stroitel'stvo* [*Transport construction*], 2012, no. 12, pp. 20–21. (In Russian)
- 12. Svatovskaia L. B., Shershneva M. V., Rusanova E. V. & Savel'eva M. Iu. Geoekozashchitnye svoistva tekhnologicheskikh reshenii v transportnom stroitel'stve ot vozdeistviia organicheskikh zagriaznenii [Geo-ecological properties of technological solutions in transport construction from effects of organic pollution]. *Estestvennye i tekhnicheskie nauki* [*Natural and engineering sciences*], 2015, no. 11(89), pp. 304–306. (In Russian)

Received: March 02, 2020 Accepted: March 10, 2020

Author's information:

Elena M. BODENKO – Postgraduate Student; scherschneva@rambler.ru Mariia V. SHERSHNEVA – D. Sci. in Engineering, Professor; scherschneva@rambler.ru УДК 629.021

Конструирование пневмомеханического кантователя для ремонта боковых рам грузовых вагонов

О.И. Зайнитдинов, Б. А. Абдуллаев

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I Российская Федерация 190031, Санкт-Петербург Московский пр., 9

Для цитирования: Зайнитовинов О. И., Абдуллаев Б. А. Конструирование пневмомеханического кантователя для ремонта боковых рам грузовых вагонов // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2020. — Т. 17. — Вып. 2. — С. 252—262. DOI: 10.20295/1815-588X-2020-2-252-262

Аннотация

Цель: Проектирование унифицированного и экономичного пневмомеханического кантователя типа ПМК1 (кантователь с пневмомеханическим приводом) для удобства работы ремонтной бригады и полуавтоматизации технологического процесса ремонта боковых рам тележечного цеха. **Методы:** Конструирование пневмомеханического кантователя ПКМ1 осуществлялось методом конструктивной преемственности. Процесс конструирования пневмомеханического кантователя ПКМ1 выполнялся в течение нескольких этапов: изучение сферы применения и недостатки существующих аналогов; выбор и конструирование чертежей механизма, согласно ГОСТ; предварительный расчет затратов аналогичного механизма с электроприводом. **Результаты:** Представлены чертежи и рассмотрены детали пневмомеханического кантователя и их технические характеристики. Приведен краткий расчет ручного привода механизма. Проанализированы преимущества и недостатки применения кантователя с пневмомеханическим приводом в тележечным цехе вагоноремонтного предприятия. **Практическая значимость:** Представленная унифицированная конструкция пневмомеханического кантователя позволит производить плановые ремонтные работы деповского (ДР), капитального (КР), капитально-восстановительного (КВР) и другие виды технические обслуживание боковых рам грузовых вагонов без использования электроэнергии.

Ключевые слова: Кантователь, пневмомотор, двухступенчатый червячный редуктор, цепная передача, основания, захваты.

Введение

Современные условия развития экономики требуют повышения эффективности производства вагоноремонтных предприятий, освоения новых технологий, поиска резервов снижения затрат и обеспечения качества выполняемых работ. Постоянное обновление техники и технологий делает инновационный процесс основным условием производства качественной продукции и повышения производительности, а также эффективности производства предприятия. Существенное влияние на качество работы желез-

нодорожного транспорта оказывает состояние вагонного хозяйства, которое сейчас находится в достаточно сложном положении. Основная проблема — старение вагонного парка, ухудшение его технического состояния, отсутствие возможности закупок новых вагонов и запасных частей в необходимых количествах и недостаточно эффективно работающая вагоноремонтная база [1, 2].

В настоящее время техническая оснащенность некоторых депо вагоноремонтных предприятий, построенных в 1933–1940 гг., устарела и нуждается в обновлении. Одним из путей

решения этой проблемы является перевод вагоноремонтных предприятий на современные высокоэффективные ресурсосберегающие технологии [3].

Из-за устарелой ремонтной механизации вагоноремонтных цехов, а точнее тележечного цеха ремонт боковой рамы и надрессорной балки осуществляется не по нормативным документам и не отвечает технологическому процессу. Основная причина проблемы — нехватка достаточных финансовых средств и возможностей для обновления технической базы. В связи с этим качество отремонтированных боковых рам и надрессорной балки не соответствует техническим нормам приема, что сильно влияет на срок службы и техническую безопасность подвижного состава [4, 5].

Пробег отремонтированных тележек таким способом не превышает 120 тыс. км., что уменьшает пробег на 40 тыс. км, согласно ГОСТ 9246–2004, отремонтированных по РД 32 ЦВ 052–2009 [6].

Проектирование центрового двухстоечного кантователя типа ПМК1 выполнялось по ГОСТ 30295–96. Данный кантователь предназначен для подъема и поворота боковой рамы тележки грузового вагона на 380 ° с целью осмотра и ремонта рамы [7].

Основание и корпус кантователя с приводом

Все чертежи выполнены с помощью конструкторской программы версии КОМПАС-3D/V16.1.

Основание кантователя (рис. 1) состоит из H-образного швеллера (рис. 2), удерживающего всю сварную конструкцию и нагрузки, передаваемые от кантователя во время работы. Приведем геометрические параметры швеллера профиля 20У, согласно ГОСТ 8240–97 [8]:

Высота, <i>h</i> , мм 20	0
Ширина, <i>b</i> , мм)
Толщина стенки, <i>s</i> , мм 5,2	2

Радиус внутреннего	
закругления, R , мм 5	,5
Площадь сечения, F , см ² 2.	3,4

Как видно на кинематической схеме кантователя с силовым редуктором (рис. 3), кантователь состоит из двух вертикальных продольных пустотельных сварных колонок: левая сварной конструкции, на которой установлены трехрядная цепная передача и четыре шариковые радиально-упорные однорядные подшипники типа 36000, согласно ГОСТ 831–75 [9], правая колонка из сварной конструкции, на которой размещены два шариковых радиально-упорных однорядных подшипника типа 36000, согласно ГОСТ 831–75. В корпусе кантователя общее количество подшипников равно 6 шт. Приведем параметры подшипника типа 36311:

Диаметр внутреннего
кольца, <i>d</i> , мм 55
Диаметр наружного кольца,
<i>D</i> , мм
Номинальная ширина, В, мм 29
Монтажная фаска, <i>r</i> , мм 3,0
Масса подшипника, кг 1,550

При ремонте и осмотре боковая рама помещается на кантователь с помощью подъемного механизма в перевернутом виде (нижний пояс находится наверху), медленно опускается на захваты и фиксируется с помощью крепежей (рис. 3).

Схема крепления боковины захватами приведена на рис. 4.

Пневмомеханический привод

Пневмомеханический привод кантователя ПМК1 приводится в действие с помощью струи сжатого воздуха давлением 0,8 МПа (8 кгс/см²), идущей от компрессорной станции депо. В качестве силового механизма применяется двухступенчатый червячный редуктор типа Ч2-125, имеющий крутящий момент, равный 950 Нм.

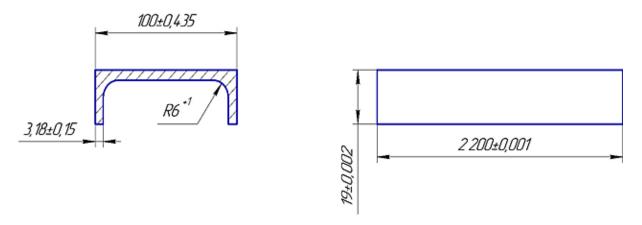


Рис 1. Основные размеры швеллера (мм)

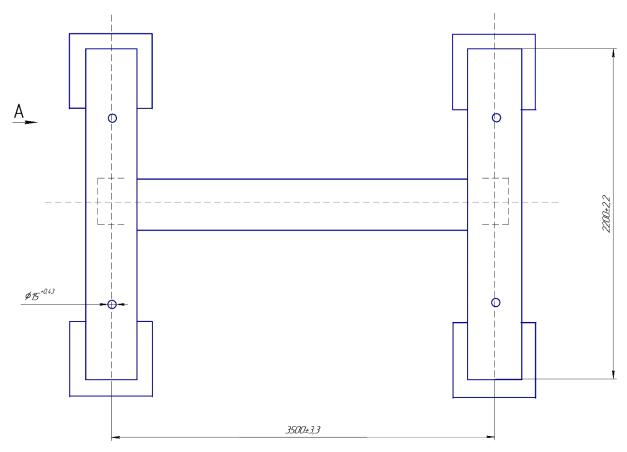
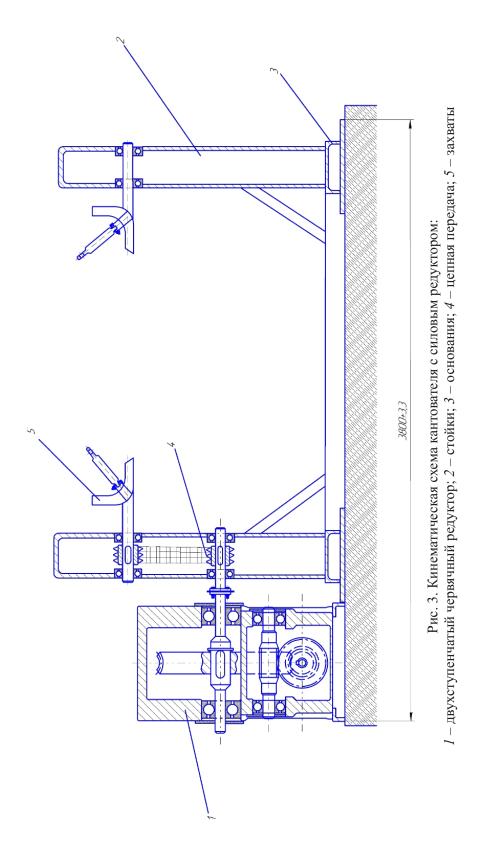


Рис. 2. Н-образный швеллер основания кантователя



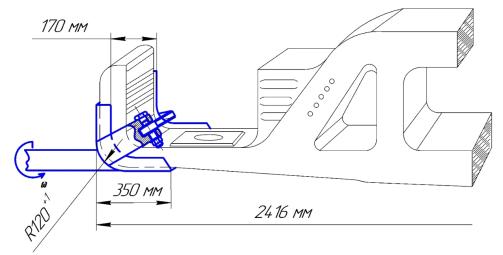


Рис. 4. Схема крепления боковины захватами

ТАБЛИЦА 1. Выбор и технические характеристики пневмомеханического привода

Пневмомотор типа 16AM-FCW-28			Редуктор типа Ч2-125, ГОСТ 29067–91 [10]			
Мощность пневмомо- тора, кВт	Номиналь- ный крутящий момент, Нм	Расход воздуха, м ³ /мин	Скорость холостого хода, об/мин	Передаточ-	Крутящий момент, Нм	Радиальная нагрузка, Н
7	34	7,9	1500	100	950	8000

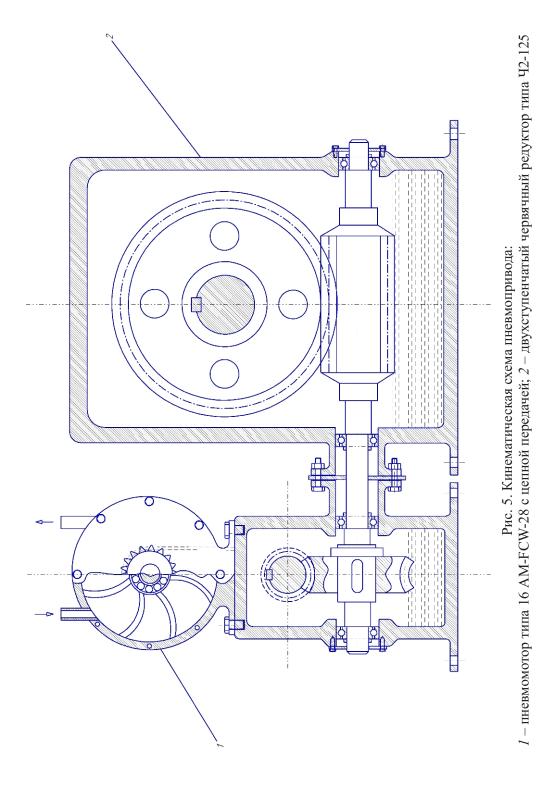
ТАБЛИЦА 2. Выбор и технические характеристики трехрядной цепной передачи, ГОСТ 13568–97 [11]

Шаг цепи, <i>t</i> , мм	Длина ролика, b_1 , мм, не менее	Диаметр валика, d_2 , мм	Диаметр ролика, d_1 , мм	Межосевое расстояние, <i>A</i> , мм	Высота пласти- ны, <i>h</i> , не более	Рас- стояние между внутрен- ними пластина- ми, <i>b</i> , не более	Разру- шающая нагрузка, кН, не менее	Масса 1 м цепи, кг
19,05	12,70	5,96	11,91	22,78	18,08	17,75	96,0	4,3

Общий вид пневмомеханического привода иллюстрирует рис. 5. Основные технические характеристики приведены в табл. 1.

Вращательный момент, выходящий из червячного редуктора, передается через вал (см.

рис. 3) на трехрядную цепную передачу, которая непосредственно вращает боковую раму. Технические характеристики трехрядной цепи модели 3 ПР-19,05–96 приведены в табл. 2.



Преимущества и недостатки кантователя

Основные преимущества кантователя ПМК1:

- его конструкция проста и надежна;
- установка рамы на кантователь легкая, надежный захват за челюсти рамы в радиусе R 55 мм;
- минимальный тонкий захват позволяет полноценно обследовать и проводить ремонт буксового проема рамы;
- кантователь при отсутствии пневмомотора может приводиться в действие с помощью ручного Z-образного рычага;
- электрический ток и все приборы, связанные с ним, отсутствуют;

Независимость от электрической сети делает кантователь экономичным, что и является главным его преимуществом.

К недостаткам данного кантователя ПКМ1 относятся низкая плавность хода, короткие рывки при работе, что характерно пневмоприводу.

Расчет расхода электроэнергии аналогичного кантователя с электроприводом

Определим расход электрического тока, который тратит электродвигатель мощностью в среднем 8 кВт, за одну 8-часовую смену:

где $P_{_{9,\mathrm{H}}}$ – мощность электродвигателя, кВт; $t_{_{\mathrm{p,B}}}$ – рабочая время за смену, ч.

Тогда расход электрического тока, затраченный электродвигателем за один месяц (20 рабочих дней = 160 ч) составит

$$8 \times 160 = 1280 \text{ kBt.}$$

Согласно вышеприведенному расчету, потребляемость электрического тока электродвигателем за один год (например, в 2020 г. 250 $_{\rm p.д}$ = 2000 ч) будет равна

$$8 \times 2000 = 16,000 \text{ kBt.}$$

Исходя из приведенных выше расходов электроэнергии, можно посчитать общую стоимость расхода за один год (2020 г., 1 кBt = 4 руб.):

$$4 \times 16,000 = 64,000$$
 тыс. руб.

Итак, на кантователь с электроприводом мощностью 8 кВт за потребление электроэнергии в среднем за год выделяется 64,000 тыс. руб.

Расчет требуемого усилия для вращения кантователя вручную

Расчет требуемого усилия для вращения редуктора вручную Z-образным рычагом (рис. 6) выполнялось согласно ГОСТ 21753—76 «Система человек—машина. Рычаги управления» [12]. Нужное усилие для вращения одной рукой редуктора Z-образным рычагом F_p не должно превышать 22 кгс (215 H). Вычислим максимально допустимый момент на валу рычага:

$$M_p = F_p \times L_p$$

где $M_{_p}$ – максимально допустимый момент; $F_{_p}$ – требуемое усилие; $L_{_p}$ – длина рычага (0,30 м).

Рычаг для вращения редуктора состоит из металлического стержня из двух втулок, к нижней втулке крепится рукоятка с резиновым покрытием и с другого конца стержня — шпоночная втулка для крепления рычага к входному валу редуктора с помощью болта марки М14.

Подставив значения, получим

$$M_p = 215.0,30 = 64,5 \text{ H/m}.$$

Согласно проведенным расчетам, максимальное усилие (пиковая нагрузка) на рычаге $M_{\rm max}$ возникает в начале вращения рычага и составляет примерно 300 H/M.

Сравним полученные результаты:

$$M_p > \frac{M_{\text{max}}}{II}$$

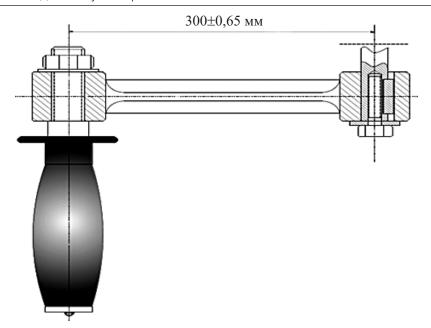


Рис. 6. Общий вид рычага для вращения редуктора

где $M_{\mbox{\tiny Max}}$ — максимальное усилие; U — передаточное число редуктора, равное 100. Отсюда

$$64.5 > \frac{300}{100} = 3.0.$$

Как видно, максимальное усилие соответствует требованиям ГОСТ 21753–76, а также имеет коэффициент запаса, равный 20, который гарантирует непрерывную работу даже при отсутствии пневмопривода и неблагоприятных условиях производства.

Заключение

Приведены кинематические схемы и чертежи проектируемого пневмомеханического кантователя. Унификация сконструированного данного кантователя является отличием от существующих аналогов крепления боковой рамы захватами в радиусе *R* 55 мм. Представлены расчеты требуемого усилия для вращения редуктора вручную Z-образным рычагом при отсутствии пневмомотора и определено потребление электроэнергии кантователем с электрическим приводом.

В целях экономии финансовых средств вагоноремонтного депо, а именно тележечного цеха, при ремонте и осмотре боковых рам грузовых вагонов предлагается использовать кантователь унифицированного типа ПМК1, который работает на неисчерпаемом запасе сжатого воздуха из сети воздухопровода вагоноремонтного предприятия.

Библиографический список

- 1. Бороненко Ю. П. Специализация универсальных и универсализация специализированных грузовых вагонов эффективное направление повышения производительности / Ю. П. Бороненко // Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты: сб. науч. статей. СПб.: ПГУПС, 2009. С. 5—16.
- 2. Ясенко Е.П. Основы проектирования и эксплуатации технологического оборудования : учеб. пособие. 2-е изд., перераб. / Е.П. Ясенко, Л. А. Парфенова. Братск : БрГУ, 2005.-140 с.
- 3. Кармацкий В. Ф. Оборудование вагоноремонтных предприятий: учебник для специальности 23.05.03 «Подвижной состав железных дорог» и специализации «Вагоны» / В. Ф. Кармацкий, Д. В. Волков. Екатеринбург: УрГУПС, 2014. 186 с.

- 4. Болотин М. М. Автоматизированные рабочие места и экспертные системы вагоноремонтного про-изводства: в 2 кн. / М. М. Болотин. М.: МИИТ, 1996. 109 с.
- 5. Любушин Н. П. Анализ финансово-экономической деятельности предприятия: учеб. пособие для вузов / Н. П. Любушин, В. Б. Лещева, В. Г. Дьякова; под ред. Н. П. Любушина. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2008. 471 с.
- 6. ГОСТ 9246—2004. Тележки двухосные грузовых вагонов магистральных железных дорог колеи 1520 мм. Технические условия. М. : Гос. науч. исслед. ин-т вагоностроения, 2005.-11 с.
- 7. ГОСТ 30295–96. Межгосударственный стандарт. Кантователи сварочные. Типы, основные параметры и размеры. Разработан МТК 72 Украинским конструкторско-технологическим институтом сварочного производства (УкрИСП). 2000. 8 с.
- 8. ГОСТ 8240–97. Швеллеры стальные горячекатаные. Киев: Укр. гос. науч.-исслед. ин-т металлов, 2002. 14 с.
- 9. ГОСТ 831–75. Подшипники шариковые радиально-упорные однорядные. Утв. Постановлением Государственного комитета стандартов Совета

- Министров СССР от 28 ноября 1975 г. № 3740. М.: Изд-во стандартов, 1977. 15 с.
- 10. ГОСТ 29067–91. Редукторы и мотор-редукторы. Утв. Постановлением Государственного комитета стандартизации и метрологии СССР 3 июля 1991 г. № 1206. М.: Изд-во стандартов, 1991. 19 с.
- 11. ГОСТ 13568–97. Цепи приводные роликовые и втулочные. Утв. Межгосударственным Советом по стандартизации, метрологии и сертификации РФ 25 апреля 1997 г. № 11-97. М. : Изд-во стандартов, 1997. 27 с.
- 12. ГОСТ 21753–76. Система человек—машина. Рычаги управления. Утв. Постановлением Государственного комитета стандартов Совета Министров СССР от 27 апреля 1976 г. № 952. М. : Изд-во стандартов, 1977. 6 с.

Дата поступления: 04.03.2020 г. Решение о публикации: 11.03.2020 г.

Контактная информация:

ЗАЙНИТДИНОВ Олмос Ирикович – аспирант; zaynitdinovo@mail.ru АБДУЛЛАЕВ Бахром Актамович – аспирант; baxrom86@yandex.ru

Designing a pneumatic mechanical tilter for repair of freight wagon bogie side frames

O. I. Zaynitdinov, B. A. Abdullayev

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Zaynitdinov O.I., Abdullayev B.A. Designing a pneumatic mechanical tilter for repair of freight wagon bogie side frames. *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2020, vol.17, iss. 2, pp. 252–262. DOI: 10.20295/1815-588X-2020-2-252-262

Summary

Objective: To engineer a standardized and cost efficient pneumatic mechanical tilter of PMK1 type (tilter with pneumatic mechanical drive) for the convenience of the repair team and semi-automation of the side frame repairing process in the bogie workshop. **Methods:** The PMK1 pneumatic mechanical tilter has been designed using the method of succession in designing. The PMK1 tilter was designed in several stages: study of the scope of application and disadvantages of existing analogues; selection and design

of mechanism drawings according to GOST; preliminary calculation of the costs of a similar mechanism with electric drive. **Results:** Drawings have been presented and parts of the pneumatic mechanical tilter and their technical characteristics have been considered. A brief calculation of the mechanism manual drive has been provided. The study analyzes the advantages and disadvantages of using a tilter with a pneumatic mechanical drive in the bogie workshop of a car repair facility. **Practical importance:** The presented standardized design of the pneumatic mechanical tilter will enable scheduled repairs of depot (DR), general (GR), capital recovery (CRR), and other types of maintenance of the freight car side frames without the use of electricity.

Keywords: Tilter, pneumatic motor, double-stage worm gearbox, chain transmission, bases, grippers.

References

- 1. Boronenko Yu. P. Spetsializatsiya universal'nykh i universalizatsiya spetsializirovannykh gruzovykh vagonov effektivnoye napravleniya povysheniya proizvoditel'nosti [Specialization of the standardized and standardization of the specialized freight cars— effective approach to increase the performance]. *Podvizhnoy sostav XXI veka: idei, trebovaniya, proyekty.* Sb. nauch. statey [Rolling stock of the 21st century: ideas, requirements, projects. Scientific articles]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2009, pp. 5–16. (In Russian)
- 2. Yasenko E.P. & Parfenova L.A. Osnovy proyektirovaniya i ekspluatatsii tekhnologicheskogo oborudovaniya. Ucheb. posobiye. 2-e izd., pererab. [Fundamentals of the design and operation of process equipment. Textbook. Ed. 2, revised]. Bratsk, BrSU [Bratsk State University] Publ., 2005, 140 p. (In Russian)
- 3. Karmatskiy V.F. & Volkov D. V. *Oborudovaniye* vagonoremontnykh predpriyatiy [Equipment for wagon repair facilities]. Textbook for specialty 23.05.03 "Railways rolling stock" and specialization "Wagons". Yekaterinburg, UrGUPS Publ., 2014, 186 p. (In Russian)
- 4. Bolotin M. M. Avtomatizirovannyye rabochiye mesta i ekspertnyye sistemy vagonoremontnogo proizvodstva. V 2 kn. [Automated workplaces and expert systems for wagon repair facility. 2 books]. Moscow, MIIT Publ., 1996, 109 p. (In Russian)
- 5. Lyubushin N.P., Leshcheva V.B. & D'yakova V.G. Analiz finansovo-ekonomicheskoy deyatel'nosti predpriyatiya. Ucheb. posobiye dlya vuzov [Analysis of the financial and economic activities of an enterprise. Text-

- book for universities]. Edited by N. P. Lyubushin. Moscow, UNITY-DANA Publ., 2008, 471 p. (In Russian)
- 6. GOST 9246–2004. Telezhki dvukhosnyye gruzovykh vagonov magistral'nykh zheleznykh dorog kolei 1520 mm. Tekhnicheskiye usloviya [Four-wheel bogies of freight cars for 1520 mm gauge mainline railways. Specifications]. Moscow, State Scientific Research Institute of Carriage Building Publ., 2005, 11 p. (In Russian)
- 7. GOST 30295–96. Mezhgosudarstvennyy standart. Kantovateli svarochnyye. Tipy, osnovnyye parametry i razmery [Interstate standard. Welding positioners. Types, basic parameters and dimensions]. Developed by Interstate Technical Committee 72; Ukrainian Design and Technology Institute of Welding Production (UkrISP). Kiev, 2000, 8 p. (In Russian)
- 8. GOST 8240–97. Shvellery stal'nyye goryachekatanyye [Hot-rolled steel channels]. Kiev, Ukrainian State Scientific Research Institute of Metals Publ., 2002, 14 p. (In Russian)
- 9. GOST 831–75. Podshipniki sharikovyye radial'no-upornyye odnoryadnyye [Single-row angular ball bearings]. Approved by Resolution N 3740 of the State Committee of Standards of the USSR Council of Ministers dated November 28, 1975. Moscow, Izdatel'stvo standartov [Publishing House of Standards] Publ., 1977, 15 p. (In Russian)
- 10. GOST 29067–91. Reduktory i motor-reduktory [Reducers and motor-reducers]. Approved by Resolution N 1206 of the USSR State Committee for Standardization and Metrology dated July 03, 1991. Moscow, Izdatel'stvo standartov [Publishing House of Standards] Publ., 1991, 19 p. (In Russian)
- 11. GOST 13568–97. Tsepi privodnyye rolikovyye i vtulochnyye [Driving roller and bush chains]. Approved

by Resolution N 11-97 of the Russian Interstate Council on Standardization, Metrology and Certification dated April 25, 1997. Moscow, Izdatel'stvo standartov [Publishing House of Standards] Publ., 1997, 27 p. (In Russian)

12. GOST 21753–76. Sistema chelovek–mashina. Rychagi upravleniya [Man-machine system. Control levers]. Approved by Resolution N 952 of the State Committee of Standards of the USSR Council of Ministers dated April

27, 1976. Moscow, Izdatel'stvo standartov [Publishing House of Standards] Publ., 1977, 6 p. (In Russian)

Received: March 04, 2020 Accepted: March 11, 2020

Author's information:

 $Olmos\ I.\ ZAYNITDINOV-Postgraduate\ Student;$

zaynitdinovo@mail.ru

Bakhrom A. ABDULLAEV - Postgraduate Stu-

dent; baxrom86@yandex.ru

УДК 504:311

Применение природных растворов для обезвреживания ионов свинца

М.В. Шершнева, А.Б. Бобровник

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр. 9

Для цитирования: *Шершнева М. В., Бобровник А. Б.* Применение природных растворов для обезвреживания ионов свинца // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2020. - T. 17. - Bып. 2. - C. 263–268. DOI: 10.20295/1815-588X-2020-2-263-268

Аннотация

Цель: Исследовать возможность использования некоторых природных растворов для обезвреживания ионов свинца, в настоящее время являющегося одним из наиболее опасных видов загрязнения техногенных грунтов. Обосновать обезвреживающие свойства природных растворов с учетом образования труднорастворимого соединения свинца. Разработать технологические решения, применив природные растворы для обезвреживания ионов свинца. **Методы:** Для определения концентрации ионов свинца в водных вытяжках техногенного грунта использовался ионно-селективный метод. **Результаты:** Обнаружены и изучены обезвреживающие свойства таких природных растворов как морская вода и природная сульфатная вода магниевого класса. Охарактеризованы обезвреживающие свойства этих вод. Предложены технологические решения по применению природных вод для обезвреживания ионов свинца. Выведены формулы для расчета необходимой дозы природных растворов для обезвреживания ионов свинца в техногенном грунте. **Практическая значимость**: Полученные результаты могут быть использованы при подготовке участка к строительству промышленного и гражданского назначения, а также при осуществлении хозяйственной деятельности, например, при рекультивации полигонов твердых бытовых отходов.

Ключевые слова: Ионы свинца, обезвреживание, природные растворы, технологическое решение, доза раствора.

Необходимость разработки теоретически обоснованных мер по защите окружающей среды от ионов свинца при осуществлении строительной и хозяйственной деятельности обусловлена государственной программой Российской Федерации «Охрана окружающей среды»; связана с повышением уровня экологической безопасности и сохранением природных систем.

Ионы свинца являются фактором экологической опасности, так как поступают от источника загрязнения в геосферные оболочки Земли, концентрируются в них и, ввиду своей подвижности, могут поглощаться растениями и по пищевой цепи попадать в организмы человека и животных.

По данным государственных докладов Министерства природы России за последние пять лет содержание свинца в почвах вокруг крупных городов достигало 294 предельно допустимых концентраций (ПДК, г/кг) по свинцу (г. Владикавказ) (табл. 1).

Загрязненные почвы относятся к главным экологическим проблемам и для Санкт-Петер-бурга. Среднее значение концентраций свинца в почвах жилых районов, промышленных зон и зон перспективной застройки города, по данным Российского геоэкологического центра, превышает 2,6 ПДК по свинцу.

Один из перспективных путей защиты окружающей среды от ионов свинца – связывание

Содержание ионов свинца в почвах Российской Федерации, мг/кг	Отношение площади, загрязненной ионами свинца, к общей площади Российской Федерации, %	Наименование территорий Российской Федерации	
До 10	28	Северный, Северо-Западный, Западно-Сибирский	
10–20	61	Западно-Сибирский, Восточно-Сибирский, Дальневосточный	
20–30	7	Уральский, Центрально-Черноземный, Северо-Кавказский	
30–50	4	Южный Урал, Читинская и Ростовская области, район Кавказского биосферного заповедника	

ТАБЛИЦА 1. Загрязнение почв ионами свинца

их в труднорастворимые соединения, которые являются аналогами природных минералов. Поэтому для строительной и хозяйственной деятельности актуален поиск веществ, которые позволят обезвредить ионы свинца [1–5]. Для этого с учетом произведения растворимости можно использовать некоторые природные растворы, например морскую воду и сульфатные воды магниевого класса.

Необходимо показать, что защита от ионов свинца возможна при применении природных растворов путем самопроизвольного образования труднорастворимых соединений.

Актуальность данного исследования подтверждается многими данными. Так, вследствие пожара в соборе Парижской Богоматери (Франция), произошедшего 15 апреля 2019 г., обрушились шпиль и части крыши собора из-за расплавления 400 т свинца, который использовался при строительстве. Это вызвало обширное свинцовое заражение территорий вокруг собора и близлежащих районов. По данным Агентства здравоохранения Парижа, оно достигало нескольких сотен тысяч микрограмм на квадратный метр. Зафиксировано несколько

случаев свинцового отравления у детей. Сразу после пожара в районе Нотр-Дама были закрыты три школы.

Предпринятые властями города мероприятия по обеззараживанию, основанные на обработке поверхностей водой, не привели к ожидаемым результатам, и уровень загрязнения остается крайне высоким.

В соответствии с высказанным мнением, что нейтрализация ионов тяжелых металлов должна основываться на образовании труднорастворимого соединения, была рассмотрена возможность использования природных растворов на примере природных вод сульфатного класса магниевой группы (S_{II}^{Mg}) и морской воды (MB) для нейтрализации ионов свинца из грунтовой влаги [6–10].

В табл. 2 представлены результаты нейтрализации природными растворами ионов свинца в водной вытяжке грунта с различной степенью загрязненности.

Следует отметить, что применение природных растворов для защиты от ионов свинца приводит к образованию минерала, аналогичного природным, в частности англезита.

Концентрация ионов свинца, моль/л					
в растворе для загрязнения	в водной вытяжке	в водной вытяжке грунта после обработки природными растворами			
грунта	загрязненного грунта	$\mathbf{S}^{ ext{Mg}}_{ ext{II}}$	Морская вода		
$1 \cdot 10^{-1}$	2.10-3	1,2·10 ⁻⁵	$0,34 \cdot 10^{-3}$		
1.10-2	2.10-4	1,0.10-6	1,0.10-6		
1.10-3	2.10-5	<1,0.10-6	<1,0.10-6		
1.10-4	2.10-6	<1,0.10-6	<1,0.10-6		

ТАБЛИЦА 2. Результаты по обезвреживанию ионов свинца природными растворами

Технологическое решение при осуществлении строительной и хозяйственной деятельности для защиты от ионов свинца предполагает обработку загрязненных территорий природными растворами путем орошения или инъектирования, например, при помощи машин для внесения жидких удобрений. Схема технологического решения представлена на рисунке.

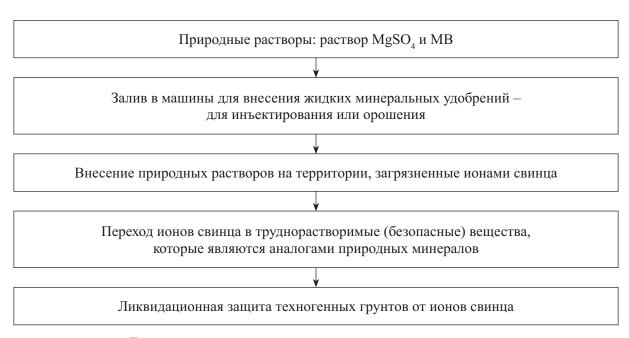
Необходимый объем природного раствора для снижения на 1 ПДК по ионам свинца рассчитывается по формуле

$$V = \frac{\Pi \coprod K}{M \ni_{ph^{2+}} \cdot H}$$
,

где V— необходимый объем природного раствора, л/кг; $M\Theta_{pb^{2+}}$ — моль-эквивалентная масса ионов свинца, г/моль-эквивалент; H — нормальная концентрация природного раствора, рассчитанная на активную составляющую раствора, моль-эквивалент/л.

Формула является базовой, и значение объема V умножается на величину индекса ПДК.

Расчеты показали, что для уменьшения концентрации ионов свинца, соответствующей 1 ПДК, в 1 т техногенного грунта необходимо внести до 20 л природных вод сульфатного класса магниевой группы (S^{Mg}_{II}) (слабой минерализации) или 12 л морской воды (с учетом солено-



сти Балтийского моря). Опытно-промышленная апробация на территории строительной компании показала снижение концентрации свинца в 10 раз.

Модифицированный гипсовый или магнезиальный камень, а также природные растворы, можно использовать в технологических решениях для подготовки к строительству участка (гражданскому, промышленному, транспортному), а также при осуществлении хозяйственной деятельности, в частности при рекультивации полигонов твердых бытовых отходов.

Таким образом, было установлено, что для обезвреживания ионов свинца в техногенных грунтах можно применять некоторые природные растворы, например морскую воду и сульфатную воду магнезиального класса. При этом ионы свинца переходят в максимально безопасное состояние, аналогичное природному, образуя минералы типа англезита с низким произведением растворимости. Опытно-промышленная апробация доказала возможность использования природных растворов. В работе предложена формула для расчета необходимой дозы природного раствора.

Библиографический список

- 1. Сватовская Л.Б. Инженерно-химические основы геозащиты природно-техногенных систем / Л.Б. Сватовская, М. Н. Латутова, А. М. Сычева, М. В. Шершнева, А. А. Кондрашов, М. Ю. Савельева // Транспортное строительство. 2012. N 2. C. 20 -21.
- 2. Сватовская Л. Б. Геоэкозащитные свойства технологических решений в транспортном строительстве от воздействия органических загрязнений / Л. Б. Сватовская, М. В. Шершнева, Е. В. Русанова, М. Ю. Савельева // Естественные и технические науки. -2015. N 11 (89). C. 304-306.
- 3. Дробышев Д.И. Инженерно-химические основы получения резательных пеноавтоклавных изделий и их геозащитные свойства / Д.И. Дробышев, И.П. Филатов, А.В. Хитров, М.В. Шершнева, В.Я. Соловьева, В.А. Чернаков, В.Д. Мартынова. СПб. : ПГУПС, 2009. 81 с.

- 4. Сватовская Л.Б. Эко- и геоэкозащита природнотехногенных систем. Теория и практика / Л.Б. Сватовская, М.В. Шершнева, М.М. Байдарашвили, А.М. Сычева, Д.С. Старчуков, А.С. Сахрова, О.В. Юров, А.А. Кабанов, Н.Н. Ефимова, А.Б. Бобровник, Н.А. Шредник, С.В. Симонюк, К.С. Мальчевская, М. Абу-Хасан. СПб.: ПГУПС, 2016. 62 с.
- 5. Масленникова Л. Л. Технология утилизации осадка природных вод / Л. Л. Масленникова, Н. А. Бабак, Д. Н. Бухарина, М. В. Шершнева // Экология урбанизированных территорий. -2008.- № 3.- С. 82-85.
- 6. Сватовская Л. Б. Инженерно-химические и естественно-научные основы создания новых эко- и геозащитных технологий / Л. Б. Сватовская, Л. Л. Масленникова, Е. И. Макарова, Н. А. Бабак, М. В. Шершнева. СПб.: ПГУПС, 2011. 89 с.
- 7. Сватовская Л. Б. Применение индикаторного метода новое перспективное направление для выбора компонентов экозащитных систем для транспорта / Л. Б. Сватовская, Н. И. Якимова, М. В. Шершнева, М. М. Байдарашвили // Наука и техника транспорта. 2004. N 2. С. 12—17.
- 8. Шершнева М. В. Фундаментальная природа гидратсодержащих твердых фаз в развитии детокси-кационных технологий / М. В. Шершнева // Инновационные технологии в строительстве и геоэкологии : Материалы I Междунар. науч.-практич. конференции. СПб. : ПГУПС, 2014. С. 15–17.
- 9. Сватовская Л.Б. Инновационные естественнонаучные технические решения в строительной деятельности / Л.Б. Сватовская, В.Я. Соловьева, М.С. Абу-Хасан, М.В. Шершнева, Л.Л. Масленникова, М.М. Байдарашвили // Перспективы будущего в образовательном процессе: сб. тезисов национальной науч.-технич. конференции. — 2017. — С. 108—109.
- 10. Шершнева М. В. Научные основы технологий утилизации силикатсодержащих отходов: дис. ... д-ра техн. наук / М. В. Шершнева. СПб.: ПГУПС, 2009. 304 с.

Дата поступления: 02.03.2020 г. Решение о публикации: 10.03.2020 г.

Контактная информация:

ШЕРШНЕВА Мария Владимировна — д-р техн. наук, профессор; scherschneva@rambler.ru БОБРОВНИК Анна Борисовна — аспирант; scherschneva@rambler.ru

Application of natural solutions to deactivation of lead nuclei

M. V. Shershneva, A. B. Bobrovnik

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Shershneva M. V., Bobrovnik A. B. Application of natural solutions to deactivation of lead nuclei. *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2020, vol. 17, iss. 2, pp. 263–268. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2020-2-263-268

Summary

Objective: Study the possibility of application of some natural solutions for deactivation of lead nuclei which is now one of the most dangerous types of pollution of man-made soils. Present an argument for deactivating properties of natural solutions, taking into account the formation of lead compound of low solubility. Develop technology design by applying natural solutions to deactivate lead nuclei. **Methods:** Ion-selective method was used for definition of concentration of lead nuclei in water extracts of man-made soil. **Results:** Deactivating properties of such natural solutions as sea water and natural magnesium-class sulfate water were discovered and studied. Deactivating properties of these solutions are described. Technology designs for application of natural waters for deactivation of lead nuclei are proposed. Formulae for calculation of required dosage of natural solutions for deactivating lead nuclei in man-made soil are introduced. **Practical importance:** Obtained results can be used in preparing a site for industrial and commercial construction, as well as in performing economic activities, for example, reclamation of domestic solid waste landfills.

Keywords: Lead nuclei, deactivation, natural solutions, technology design, solution dosage.

References

- 1. Svatovskaia L. B., Latutova M. N., Sycheva A. M., Shershneva M. V., Kondrashov A. A. & Savel'eva M. Iu. Inzhenerno-khimicheskie osnovy geozashchity prirodnotekhnogennykh sistem [Chemical-engineering foundations of geo-protection of natural and man-made systems]. *Transportnoe stroitel'stvo* [*Transport construction*], 2012, no. 12, pp. 20–21. (In Russian)
- 2. Svatovskaia L. B., Shershneva M. V., Rusanova E. V. & Savel'eva M. Iu. Geoekozashchitnye svoistva tekhnologicheskikh reshenii v transportnom stroitel'stve ot vozdeistviia organicheskikh zagriaznenii [Geo-ecological properties of technological solutions in transport construction from effects of organic pollution]. *Estestvennye i tekhnicheskie nauki* [*Natural and engineering sciences*], 2015, no. 11 (89), pp. 304–306. (In Russian)
- 3. Drobyshev D. I., Filatov I. P., Khitrov A. V., Shershneva M. V., Solov'eva V. Ia., Chernakov V.A. & Martynova V.D. *Inzhenerno-khimicheskie osnovy polucheniia*

- rezatel'nykh penoavtoklavnykh izdelii i ikh geozashchitnye svoistva [Engineering and chemical foundations of manufacturing of cutting foam-autoclave products and their geo-protective properties]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2009, 81 p. (In Russian)
- 4. Svatovskaia L. B., Shershneva M. V., Baidarashvili M. M., Sycheva A. M., Starchukov D. S., Sakhrova A. S., Iurov O. V., Kabanov A. A., Efimova N. N., Bobrovnik A. B., Shrednik N. A., Simoniuk S. V., Mal'chevskaia K. S. & Abu-Khasan M. *Eko- i geozashchita prirodno-tekhnogennykh sistem. Teoriia i praktika [Eco- and geo-protection of natural and man-made systems. Theory and practice]*. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2016, 62 p. (In Russian)
- 5. Maslennikova L. L., Babak N. A., Bukharina D. N. & Shershneva M. V. Tekhnologiia utilizatsii osadka prirodnykh vod [Technology for utilisation of natural waters sludge]. *Ekologiia urbanizirovannykh territorii*

[*Urbanised territories' ecology*], 2008, no. 3, pp. 82–85. (In Russian)

6. Svatovskaia L. B., Maslennikova L. L., Makarova E. I., Babak N. A. & Shershneva M. V. *Inzhenerno-khimicheskie i estestvenno-nauchnye osnovy sozdaniia novykh eko- i geozashchitnykh tekhnologii* [*Chemical engineering and natural-scientific foundations for creating new eco- and geo-protective technologies*]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2011, 89 p. (In Russian)

7. Svatovskaia L.B., Iakimova N.I., Shershneva M.V. & Baidarashvili M.M. Primenenie indikatornogo metoda – novoe perspektivnoe napravlenie dlia vybora komponentov ekozashchitnykh sistem dlia transporta [Application of indicator method as a new promising trend in selection of components of eco-protection systems for transport]. *Nauka i tekhnika transporta* [*Transport science and technology*], 2004, no. 2, pp. 12–17. (In Russian)

8. Shershneva M. V. Fundamental'naia priroda gidratsoderzhashchikh tverdykh faz v razvitii detoksikatsionnykh tekhnologii [Fundamental nature of hydrateincluding solid phases in development of detoxification technologies]. *Innovatsionnye tekhnologii v stroitel'stve i geoekologii* [*Innovative technologies in construction and geo-ecology*]. Proc. of the 1st Intern. Sci. and Practical Conference. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State

Transport University] Publ., 2014, pp. 15–17. (In Russian)

9. Svatovskaia L. B., Solov'eva V. Ia., Abu-Khasan M. S., Shershneva M. V., Maslennikova L. L. & Baidarashvili M. M. Innovatsionnye estestvenno-nauchnye technicheskie resheniia v stroitel'noi deiatel'nosti [Innovative natural-science engineering solutions in construction activity]. *Perspektivy budushchego v obrazovatel'nom protsesse* [*Prospects of the future in educational process*]. Collected abstracts of National Research and Technical Conference, 2017, pp. 108–109. (In Russian)

10. Shershneva M. V. Nauchnye osnovy tekhnologii utilizatsii silikatsoderzhashchikh otkhodov [Scientific foundations for technologies of utilization of waste containing silicate]. Dr. Sci. Eng. dissertation. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2009, 304 p. (In Russian)

Received: March 02, 2020 Accepted: March 10, 2020

Author's information:

Mariia V. SHERSHNEVA – D. Sci. in Engineering, Professor; scherschneva@rambler.ru Anna B. BOBROVNIK – Postgraduate Student; scherschneva@rambler.ru